
趣味物理学

内 容 简 介

这部书是苏联著名科普作家、科学趣味大师雅·别莱利曼的作品。著者从日常生活、科学技术、自然界和科幻小说里收集了许多与物理学有关的疑难问题、有趣的问题、复杂或者出人意料的物理现象，作了详细的分析和讨论，内容涉及到物理学的各个方面，包括力学、热学、电磁学、光学、声学的基本定律和各种现象，目的是使读者能够灵活地运用学到的物理知识，启迪读者在科学上进行严肃的思考和探索。现在，科学技术正突飞猛进，物理学有了许多重大的发展，但作为一部讲述物理学基本原理的科普著作，仍不失它的参考价值。

●中国科普创作协会外国科普创作研究委员会主任符其珣回忆说：我还是第一次读到这样妙趣横生而又立论缜密的科普著作，一些我过去在学校里感到十分难懂、令人头痛的物理问题，到了他的笔下，好像都改变了呆板的面目，显得和蔼可亲了。

●作者娴熟地掌握了文学语言和科学语言，能把一个问题、一个原理叙述得简洁生动而又十分准确，娓娓而谈，使人忘记自己是在读书、看文章，而倒像是在听什么奇异的故事。

●别莱利曼就是这样一位卓越的通俗作家，他总是通过有趣的叙述启迪读者在科学上进行严肃的思考和探索。

世界科普名著精选

趣味物理学

[苏联] 雅·别莱利曼 著
符其珣 滕砥平 译

湖南教育出版社

Я.И.ПЕРЕЛЬМАН
ЗАНИМАТЕЛЬНАЯ ФИЗИКА
КНИГА ВТОРАЯ
ФИЗМАТГИЗ
МОСКВА

世界科普名著精选
趣味物理学
[苏联] 雅·别莱利曼 著
符其珣 滕砥平 译
责任编辑：谭清莲
湖南教育出版社出版发行
（长沙市韶山北路643号 邮编：410007）
湖南省新华书店经销 湖南省新华印刷二厂印刷
开本：870毫米×960毫米 1/20
印张：26 字数：420000
1999年8月第1版 2000年6月第2次印刷
印数：4001—9000
ISBN 7-5355-2860-0/G·2855
定价：41.10元（精）36.20元（平）

编委会



作者介绍

雅·别莱利曼

(1882～1942)

凡是读过别莱利曼的趣味科学读物的人，无不为他作品的优美、流畅、充实和趣味化而倾倒。从1937年我国出版了第一本别莱利曼的名著《趣味物理学》以后，这位趣味科学大师的名字和作品就开始在我国广为流传。

1882年12月17日，雅·别莱利曼诞生于俄国格罗德省别洛斯托克市。他17岁开始在报刊上发表作品，1909年大学毕业以后就全力从事教学与科学写作。1913～1916年完成《趣味物理学》，这为他后来完成一系列趣味科学读物奠定了基础。1919～1923年，他创办了原苏联第一份科普杂志《在大自然的实验室里》并任主编。1925～1932年，担任时代出版社理事，组织出版大量趣味科普图书 1935年，他创办和主持列宁格勒"趣味科学之家"，开展广泛的少年科学活动。在反法西斯侵略的卫国战争中，还为原苏联军人举办了军事科普讲座，这也是他几十

年科普生涯的最后奉献。在德国法西斯侵略军围困列宁格勒期间，这位对世界科普事业作出非凡贡献的趣味科学大师，不幸于1942年3月16日饿死。别莱利曼一生写了105本书，大部分是趣味科学读物，其中《趣味物理学》到1986年已出到第22版。

序　　言

杨振宁

在世界文明的发展史中，不同民族间的文化借鉴和交流，对于相互促进民族文化的发展发挥着重要的作用。遣唐使把中华民族的优秀文化带到了日本，丝绸之路向中东乃至欧洲输送了中国的纺织技术。至于中国古代的四大发明对于促进西方近代工业技术革命的诞生所产生的重大推动作用，更是举世公认。

随着近代工业技术革命在西方的诞生和发展，近现代的科学技术呈现出了越来越快的发展势头，特别是在人类社会将进入一个新的世纪的今天，科学技术以人们意想不到的速度和力度深刻地影响并改变着人类社会的生产、生活和未来走向。人们日渐清醒地认识到，科学技术的发展水平，已经成为决定一个国家的综合国力和国际政治地位的最主要因素。一个国家，要摆脱贫困、



走向富强，不受强国的遏制，出路在于把经济建设真正转移到依靠科技进步和提高劳动者素质的轨道上来。为此，中共中央及时颁发了《关于加强科学技术普及工作的若干意见》，这是具有战略意义的决策。我们引进、翻译和出版优秀科普图书就是落实中央精神的一项措施。

中华民族是一个伟大的民族，她善于接受和吸收其他民族文化之所长。中国古代伟大的思想家孔子就说过“三人行，必有我师焉”。正是有这种虚怀若谷的精神，才使得我们这个古老的民族能够绵延数千年而不断，饱经沧桑而巍然屹立。

20世纪以来，特别是新中国成立以来，中西文化的交流日益广泛，在这种文化的接触、融和及碰撞过程中，科普读物的引进，作为文化传播的一种重要的方式，对于民族文化的交流和深入了解，对于向国人宣传科学精神、科学思想、科学作风和科学方法，对于提高我们民族的科技意识和科学文化素质，都发挥了十分重要的作用。在面向新世纪的今天，我国改革开放的步伐雄浑而稳健，“科教兴国”的伟大战略深入人心，历经磨难的中华民族，抓住机遇，迎头赶上，在全世界范围内，认真总结文化遗产，取其精华，弃其糟粕，是非常必要和十分迫切的。基于这种想法，新闻出版署在制定国家“九五”重点图书规划时，把科普读物的出版作为规划中的一个重要方面，专门设立了科普读物出版的子规划，以推动科普读物的写作与出版。

在世界各国，一些广为流传、被世人公认的科普名著，如爱因斯坦的《物理学的进化》、法拉第的《蜡烛的故事》、别莱利曼的《趣味物理学》等等在国外几乎是



家喻户晓，影响了几代人的成长。这些经典之作是科普创作的典范，是珍贵的文化遗产，值得认真学习和继承。为此，我们组织了科学界和科普界的专家学者，一方面对在我国出版过的数千种国外科普作品进行认真梳理、研究和筛选，另一方面，我们也在世界范围内挑选在人类历史进程中发挥过和正在发挥着重要作用的优秀科普著作，把它们翻译过来，分批出版，这就是我们这套《世界科普名著精选》。第一批推出的有法拉第、法布尔、伊林、房龙、别莱利曼、费尔斯曼、比安基、伽莫夫、爱因斯坦等世界一流的科学家和科普作家的代表作品。相信今后还会有一批一批的优秀科普名著陆续出版。

在即将告别20世纪和迎接建国50周年的时刻，我们做了这样一项工作，希望这一作品集的出版，对于推动中外文化交流，推动我国科普事业的发展，提高国民科学文化素质，都发挥应有的作用。

1999年3月1日

出版者的话

新闻出版署在制定“国家九五重点图书规划”时，提出了编辑出版《世界科普名著精选》的意见，湖南教育出版社与中国科普作家协会经过反复论证与协商，承担了这一重要项目。

三年后，我们首批奉献给读者的有现代物理学奠基人爱因斯坦、电磁学奠基人法拉第、“航天之父”齐奥尔科夫斯基、大爆炸宇宙学奠基人伽莫夫、地球化学的奠基人费尔斯曼以及著名科普作家伊林、趣味大师别莱利曼等一流科学家和科普作家的代表作品，并以此作为出版者献给中华人民共和国建国50周年的一份礼物。

《世界科普名著精选》兼顾历史与当代名著，沟通科学与人文，纵观历史与未来，关注世界科普事业的发展趋势。精选的范围：一是在科技发展史上起过重要作用



的科普名著；二是被译成多国文字，在国际上有较大影响或获得过国际性奖励的科普名著；三是世界著名科普作家、科学家的代表作；四是对传播普及科学技术的新进展、新成就、新观念、新学说起过重大作用的科普名著或畅销书。

我们编辑出版这套书的目的是：一、向我国读者提供一整套展示一百年来科学技术重要发展历程，而又深入浅出、通俗易懂、生动活泼、引人入胜的科普精品，以激发人们对科学技术的兴趣，引导青少年钟情科学事业。二、把分散出版的、淹没在书海中的零星科普名著集中起来，统一规格，成套出版，以发挥整体效应。三、为图书馆、家庭书房提供一套具有长期保存和阅读价值的高水平、高质量的科普藏书。四、向广大科普工作者提供一套不同题材、不同体裁、不同风格、不同层次的科普精品，供观摩、借鉴之用，以提高我国的科普创作水平。

由于这套书涉及面广，时间跨度又很长，我们按读者对象和内容深浅程度分为三个层次：一是供初中以上文化程度的广大青少年阅读的“青少年科普类”（书脊标有红色标志）；二是供中等以上文化程度的广大科学爱好者阅读的“大众科普类”（书脊标有绿色标志）；三是供非本专业科教人员、管理人员阅读的“高级科普类”（书脊标有蓝色标志）。便于读者选择。

翻译出版这套书是一项十分繁难、艰巨的工作。从征集书目、确定版本、洽谈版权、组织翻译至编辑出版，各个环节都有一系列繁杂、细致的工作要做，为此，我们组成了一个编委会，还聘请了国内外多位科学家、

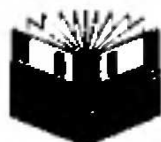


科普作家、翻译家共同来开展这项工作，以利于集思广益、群策群力。本书还得到有关领导的支持，新闻出版署署长于友先、中国科学院院长路甬祥等担任顾问。

由于我们对世界科普名著的历史和现状了解得不很全面，缺乏组织这项工作的实践经验，因而还有一些不尽人意的地方，对于缺点和不当之处，还望各界人士批评指正。

1999.6





目 录





13 圆周运动

14 万有引力

15 乘着炮弹旅行

16 液体和气体的性质







原书第十三版著者序言摘要

雅·别莱利曼

在这部书里，著者所努力希望做到的，不是告诉读者多少新的知识，而是要帮助读者“认识他所知道的事物”，也就是说，帮助读者对他在物理学方面已有的基本知识能够更深入了解，并且能够活用，教会他自觉地掌握这些知识，激发他把这些知识应用到各方面去。为了达到这个目的，书里讨论了五光十色的各种伤脑筋的题目，煞费思考的问题，引人入胜的故事，有趣的难题，各种奇谈怪论，以及从各种日常生活现象或者科学幻想小说里找到的各种出人意料的对比。著者对于后一类材料选用得特别广泛，认为这种材料最适合这部书的目的：书里选用了儒勒·凡尔纳、威尔斯、马克·吐温等人所著小说和故事里的片断。这些小说和故事里描写的幻想性的各种试验，除了它本身的强烈吸引力之外，还可以作生动的教材，在授课中起重大作用。

著者曾经尽他的能力，努力使书里的说明具有趣味的形



式，使每段内容能引人入胜。著者是被心理学上这样一种理论所指导着的，就是：对于一门学科如果发生兴趣，就会加倍注意，也容易理解，因此，也就能够更自觉地去深入领会。

这部《趣味物理学》跟同一类书籍的习惯写法不同，在叙述精彩有趣的物理学实验方面，只花了极少的篇幅。这部书有与提供实验材料的书籍不同的用处。《趣味物理学》的主要目的是，激发科学想象的活动，教会读者科学地思考，并且在他的记忆里创造无数联想，把物理知识跟他经常碰到的各种生活现象结合起来。著者在编写这部书的时候所努力遵守的方向，是列宁说的这几句话："通俗作家应该引导读者去了解深刻的思想、深刻的学说，他们从最简单的、众所周知的材料出发，用简单易懂的推论或恰当的例子来说明从这些材料得出的主要结论，启发肯动脑筋的读者不断地去思考更深一层的问题。通俗作家的对象不是那些不动脑筋的、不愿意或者不善于动脑筋的读者，相反地，他的对象是那些确实愿意动脑筋，但还不够开展的读者，帮助这些读者进行这件重大的和困难的工作，引导他们，帮助他们开步走，教会他们独立地继续前进。"[1]

由于读者对本书的历史感兴趣，下面谈谈关于本书的一些材料。

《趣味物理学》"诞生"在 1/4 个世纪以前，它是本书著者许多著作里的第一部，在著者的著作"家族"里，现在已经有了几十个成员了。

这部书的大量流传，说明了广大群众对于物理知识的活跃的兴趣，这使得著者对书里材料的质量感到责任重大。《趣味物理学》内容在各次再版时候的许多改动和增补，说明了著者对这个责任的态度。可以说，这部书是在它问世以来 25 年的全部岁月里写成的。在最近这一版里，文字上只保存了原书第一版不到 1/2 的内

〔1〕《评"自由"杂志》，《列宁全集》第 5 卷，第 278 页。



容，至于插图，几乎一幅也没有留存了。

有些读者写信给著者，要求不要再把内容改动，免得要他们“为了几十页新的书页去购买每一个新的版本”。这种想法是不会使著者放弃他尽全力改善他的著作的责任的。《趣味物理学》不是艺术创作，而是科学著作，虽说它是通俗的。它的内容——物理学——即使在最基本的材料上也不停地有新鲜的材料在充实，在丰富，因此这部书也一定得把这些材料陆续添加进去。

另一方面，我又时常听到一些责难，说《趣味物理学》没有花一些篇幅讨论像无线电最新成就、原子核分裂、现代物理学理论等等的题材。这种责难完全是误会的结果。《趣味物理学》有它一定的目的，至于上面所说这些问题的研讨，却是另外一些著作的任务。

1936 年



1 速度和运动

我们行动得有多快

优秀的径赛运动员跑完1500米，大约需要3分35秒。如果想把这个速度跟普通步行速度——1.5米每秒——做一个比较，必须先做一个简单的计算。计算的结果告诉我们，这位运动员跑的速度竟达到7米每秒。当然，这两个速度实际上是不能够相比的，因为步行的人虽然每小时只能走5公里，却能连续走上几小时，而运动员的速度虽然很快，却只能够持续很短一会儿。步兵部队在急行军的时候，速度只有赛跑的人的1/3；他们每秒钟走2米，或每小时走7公里多，但是跟赛跑的人相比，他们的长处是能够走很远很远的路程。

假如我们把人的正常步行速度去跟行动缓慢的动物，像蜗牛或者乌龟的速度相比，那才有趣哩。蜗牛这东西，确实可以算是最缓慢的动物：它每秒钟一共只能够前进1.5毫米，也就是每小时5.4米——恰好是人步行速度的1/1000! 另外一种典型的行动缓慢的动物，就是乌龟，它只比蜗牛爬得稍快一点，它的普通速度是70米每小时。

人跟蜗牛、乌龟相比，虽然显得十分敏捷，但是，假如跟周围另外一些行动还不算太快的东西相比，那就又当别论了。是的，人可以毫不费力地追过大平原上河流的流水，也不至于落在中等速度的微风后面。但是，如果想跟每秒钟飞行5米的苍蝇来较量，那人就只有用滑雪橇在雪地上滑溜，才能够追得上。至于想追过一只野兔或是猎狗的话，那么人即使骑上快马也办不到。如果想跟老鹰比赛，那么人只有一个办法：那就是坐上飞机。

人类发明了机器，就成了世界上行动最快的一种动物。

读者现在可以看一看下面这个速度比较表：

	米/秒	公里/小时		米/秒	公里/小时
蜗牛	0.001 5	0.005 4	野兔	18	65
乌龟	0.02	0.07	鹰	24	86
鱼	1	3.5	猎狗	25	90
步行的人	1.4	5	火车	28	100
骑兵常步	1.7	6	小汽车	56	200
骑兵快步	3.5	12.6	竞赛汽车(纪录)	174	633
苍蝇	5	18	大型民航飞机	250	900
滑雪的人	5	18	声音(空气中)	330	1 200
骑兵快跑	8.5	30	轻型喷气飞机	550	2 000
水翼船	17	60	地球的公转	30 000	108 000

千分之一秒

我们已经习惯使用人类的计时单位，因此，对于我们，1/1000 秒的意义简直就等于零。但是，这个微小的计时单位，却在不久之前开始在我们的实际生活中找到了应用。当人类还只是根据太阳的高度或者阴影的长短来判定时间的时候，即使想计算时间准确到几分钟也是不可能的(图 1)；当时，人们把一分钟看成是无所谓的时间，根本不值得去测量它。古时候，人们过着毫不着急的生活，在他们的日晷、滴漏、沙漏等等时计上，根本就没有“分钟”的分度(图 2)。直到 18 世纪初叶，时计面上才出现了指示“分钟”的指针——分针，而秒针还直到 19 世纪初年才出现。

1/1000 秒，在这样短促的时间里能够做些什么事情呢?能够做的事情多得很!是的，火车在这一点时间里只能跑 3 厘米，可



图 1　根据太阳的高低(左)或者阴影的长短(右)来判定时间

是声音就能够走 33 厘米，超音速飞机大约能够飞出 50 厘米；至于地球，它可以在 1/1000 秒里绕太阳转 30 米，而光呢，可以走 300 公里。

在我们四周生活着的微小生物，假如它们会思想，大概它们不会把 1/1000 秒当做“无所谓”的一段时间。对于一些小昆虫来说,这个时间就很可以察觉出来。一只蚊子,在一秒钟之内要上下振动它的翅膀 500 ~ 600 次之多；因此，在 1/1000 秒里，它来得及把翅膀抬起或放下一次。

人类自然不可能把他的器官做出像昆虫那样快的动作。我们最快的一个动作是“眨眼”，就是所谓“转瞬”或“一瞬”的本来意思。这个动作进行得非常之快，使我们连眼前暂时被遮暗都不会觉察到。但是，很少人知道这个所谓无比快的动作，假如用 1/1000 秒做单位来测量的话，却是进行得相当缓慢的。“转瞬”的全部时间，根据精确的测量，平均是 0.4 秒，也就是 400 个 1/1000 秒。它可以分做几步动作：上眼皮垂下(75 ~ 90 个 1/1000 秒)，上眼皮垂下以后静止不动(130 ~ 170 个 1/1000 秒)，以后上眼皮再抬起(大约 170 个 1/1000 秒)。这样你可以知道，所谓“一瞬”其实是花了一个相当长的时间的，



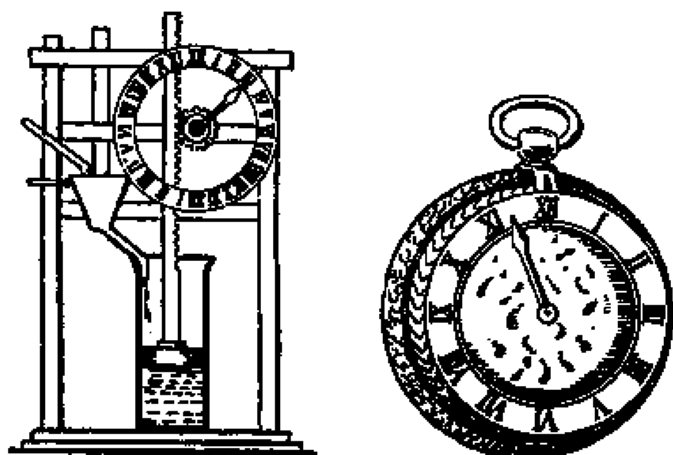


图 2　左面是古时候用的滴漏时计，右面是旧时的怀表。这两种时计上都还没有“分钟”的划分

这期间眼皮甚至还来得及做一个小小的休息。所以，假如我们能够分别察觉在每 1/1000 秒里所发生的景象，那么我们便可以在眼睛的“一瞬”间看到眼皮的两次移动以及这两次移动之间的静止情形了。

假如我们的神经系统果真有了这样的构造，我们所看到的周围事物会使你惊奇到想象不到的程度。作家威尔斯在他的小说《最新加速剂》里，对于在这种情形所看到的惊人图画有过动人的描写。这部小说的主人公喝下了一种神奇的药酒，这酒对于人的神经系统会发生一种作用，使视觉能够接受各种极快的动作。

下面是从这篇小说里摘录下来的几段：

“在这以前，你可曾看见过窗帘像这样贴牢在窗子上吗？”

我向窗帘望了一望，看见它仿佛冻僵了似的，而且它的一角给风卷起来以后，就这样保留着卷起的样子。

“我从来没有看见过，”我说，“真是多么奇怪呀！”

“还有这个呢？”他说，一面把他那握着玻璃杯的

手指伸直开来。

我以为杯子一定马上要跌碎了，但它却没有动一动：它一动不动地悬在空中。

“你一定知道，”希伯恩说，“自由落下的物体在落下的第一秒里要落下5米。这只杯子也正在跑它的这5米路——但是，你是明白的，现在一共还没有过1/100秒[1]，这件事情可以使你对我这‘加速剂’的功效有更深一步的认识。”

玻璃杯慢慢地落下去了。希伯恩把手在杯子四周以及上下方绕转着……

我向窗外望了望。一个僵化在那儿的骑自行车的人，正追着一辆也是寸步不动的小车，自行车后面弥漫着一片僵化了的尘土……我们的注意被一部僵化了的马车吸引住了。车轮的上缘、马蹄、鞭子的上端以及车夫的下颌(他正在打呵欠)——这一切，虽然慢，还都在动着；但是这辆车上的其余一切却完全僵化了，坐在车上的人恰似石膏像一般……有一个乘客在想迎风把报纸折起的时候僵化了，但是对于我们，这阵风是根本没有的。

……方才我所读、所想以及所做的一切，都是当“加速剂”渗透到我身体机能之后所发生的事，这些，对于别人以及对于整个宇宙，都只是发生在一瞬间的事。

读者们一定很愿意知道，现代科学仪器究竟能够测到多么

[1] 这里应该注意，一个自由落下的物体，在落下第一秒的第一个1/100秒的时间里，所落下的距离并不是5米的1/100，而是5米的万分之一，就是0.5毫米(按公式$s=\frac{1}{2}gt^2$计算)；至于在第一个1/1000秒里，那一共只落下0.005毫米。

短的时间。还在我们这一世纪开始的时候，就已经可以测出万分之一秒来；现在物理实验室里可以测到千亿分之一秒。这个时间跟 1 秒钟的比值，大约和 1 秒钟跟 3 000 年的时间比值相等！

时间放大镜

当威尔斯写这篇《最新加速剂》的时候，他可曾想到，这样的事情以后竟会在实际生活里实现？但是，他真算幸运——他居然活到了这一天，能够有机会用他自己的两只眼睛——虽说只是在电影银幕上——看到当时他的想象所构成的图画。这可以叫做“时间放大镜”，是把平时进行得非常快的现象用缓慢的动作在银幕上表演出来。

所谓“时间放大镜”其实只是一种电影摄影机，它和普通电影摄影机不同的地方，只在于不像普通摄影机每秒钟只拍摄 24 张照片，而是要拍出多好多倍的照片来。假如把这样拍得的片子仍旧用普通每秒钟 24 片的速度放映出来，那么观众就可以看到拖长了的动作，就可以看到比原来速度慢了许多的动作。关于这一点，读者们大概在电影上也已经看到过，例如表演跳高姿势的缓慢动作以及别种滞延动作。在比较复杂的同类仪器的帮助之下，人们已经可以达到更缓慢的程度，简直可以看到像威尔斯的小说里所描写的那些情形了。

我们什么时候绕太阳转得更快一些：在白昼还是在黑夜

巴黎的报纸有一次曾经刊出一则广告，里面说每个人只要花

25生丁[1]钱，就可以得到又经济又没有丝毫困惫痛苦的旅行方法。果然就有一些轻率的人按址寄了25生丁钱去。这些人每人得到一封回信，内容是这样的：

> 先生，请您安静地躺在您的床上，并且请您记牢：我们的地球是在旋转着的。在巴黎的纬度——49度——上，您每昼夜要跑25 000公里以上。假如您喜欢看看沿路美好的景致，就请您打开窗帘，尽情地欣赏星空的美丽吧。

这位先生终于被人用欺诈的罪名告到法院。他听完判决，付出所判的罚金之后，据说曾经用演剧的姿态站了起来，郑重地复述了伽利略的话：

“可是，无论如何它确实是在转着的呀！”

这位被告在一定意义上是正确的，因为地球上的居民不只绕着地轴在“旅行”，同时还给地球带着用更大的速度绕着太阳转。我们的地球带着它的全数居民在空间每秒移动30公里，同时还要绕地轴旋转。

这里可以提出一个有趣的问题：我们——住在地球上的人——究竟在什么时候绕太阳转得更快一些，在白昼还是在黑夜？

这个问题很容易引起误会，地球的一面如果是在白昼，那么它的另一面就必然是在黑夜，那么，这个问题的提出究竟有什么意义呢？恐怕是毫无意义的吧。

然而这儿要问的并不是整个地球在什么时候转得比较快，而是问，我们——地球上的居民——在众星之间的移动究竟在什么时候要更快一些。这样一个问题是不能够认为毫无意义的。我们在太阳系里是在进行两种运动的：绕太阳公转，同时还绕地轴自

[1] 生丁是法国货币的名字，100生丁等于1法郎。



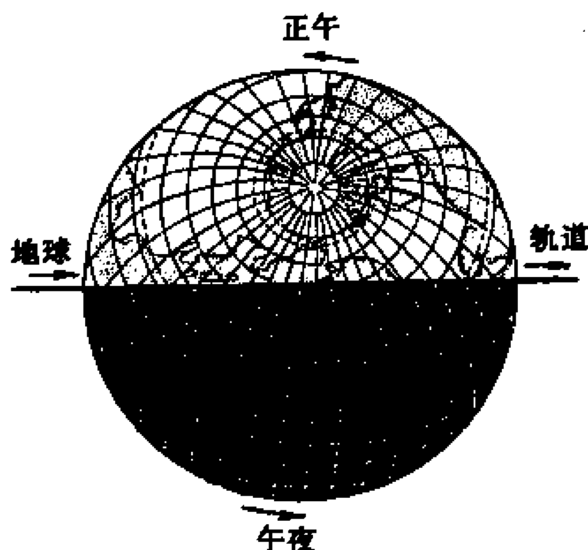


图 3　人们绕日的移动，在地球的夜半球上要比在昼半球上更快些

转。这两种运动可以加到一起，但是结果并不始终相同，要看我们的位置在地球的白昼或黑夜的一面来决定。请注意图 3，你就可以明白在午夜的时候，地球的自转速度要和它的公转前进速度相加，但是在正午时候刚刚相反，地球的自转速度要从它的公转前进速度里减去。这样看来，我们在太阳系里的移动，午夜要比正午更快些。

赤道上的每一点，每一秒大约要跑半公里，因此，在赤道地带，正午跟午夜速度的差数竟达到每秒钟整整 1 公里。而一个懂几何学的人也会不难算出，在列宁格勒(它是在纬度 60 度上)，这个差数却只有一半：列宁格勒的居民，午夜在太阳系里每秒所跑的路，比他们在正午跑的多半公里。

车 轮 的 谜

试把一张颜色纸片贴在手车的车轮(或者自行车的车胎)上，就可以在手车(或者自行车)行动的时候看到一种不平常的

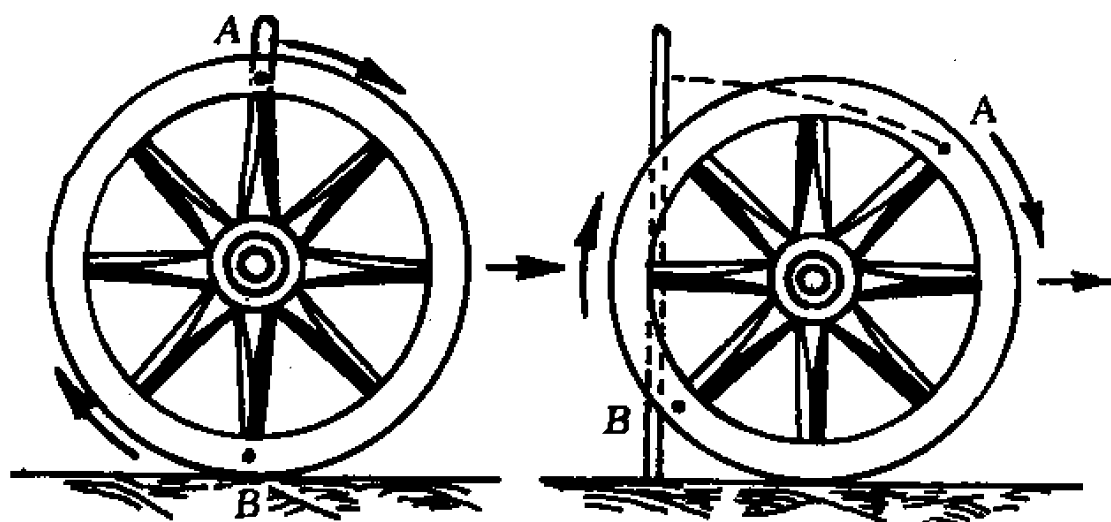


图 4　怎样证明车轮上半部的确比它的下半部移动得更快。请比较滚开了的车轮上 A、B 两点跟固定不动的木棒之间的距离(右图)

现象：当纸片在车轮跟地面相接触的那一端的时候，我们可以清楚地辨别纸片的移动；但是，当它转到车轮上端的时候，却很快闪过去了，使你来不及把它看清楚。

这样看来，车轮的上部仿佛要比下部转动得快些。这种情形你也可以在随便哪辆行驶着的车子的上下轮辐上看到，你看到的是轮子的上半部轮辐几乎连成一片，而下半部的却仍旧可以一条一条辨别清楚。这儿又使人产生一个印象，仿佛车轮的上半部要比下半部旋转得快些。

那么，这个奇怪的现象要怎样解释呢?这个解释很简单，只不过由于车轮的上半部的确要比下半部移动得更快一些罢了。这件事实初看的确不大好懂，但是只要这样想一下就会对这个结论完全相信：你知道滚动着的车轮上的每一点都在进行两种运动——绕轴旋转的运动和跟轴同时向前移动的运动。因此，就跟前节所说地球的情形一样，两个运动应该加合起来，而这加合的结果对于车轮的上半部和下半部并不相同。对于车轮的上半部，车轮的旋转运动要加到它的前进运动上，因为这两个运动都是向同一方向的。但是对于车轮的下半部，车轮的旋转却是向相反方向



…，因此也就要从前进运动…

看来，车轮上半部移动得比下半部要快一些，原因就在这里。

为了证明事情的确是这样，可以做一个简单的实验（图 4）。把一根木棒插在一辆车子的车轮旁边的地上，使这根木棒恰好竖直通过车轮的轴心，然后，用粉笔或炭块在轮缘的最上端和最下端各划出一个记号，这两个记号应该恰好是木棒通过轮缘的地方。现在，把车轮略略滚动，使轮轴离开木棒大约 20～30 厘米，然后再去看看方才的两个记号有了怎样的移动。上面的一个记号 A 移动了一大段距离，而下面的那个记号 B 却一共只离开木棒一点儿——上面的 A 点比下面的 B 点显然是移动了更大的一段距离。

车轮上最慢的部分

方才我们已经知道，行驶着的车子的车轮上所有各点，并不移动得一样快慢。那么，一个旋转车轮上究竟哪一部分移动得最慢呢?

移动得最慢的，不难想象是跟地面接触那一部分的各点。严格地说，这些点在跟地面接触的一瞬间，它们是完全没有向前移动的。

当然，以上所说的一切，都只是对于向前滚动的车轮说来是对的，但是对于那些只在固定不动的轮轴上旋转的轮子却不适用。例如一只飞轮，轮缘上的随便哪一点都是用相同的速度在移动的。

不是开玩笑的问题

下面还有一个很有趣的问题：有一列火车假定从甲地驶向乙地，在这列车上有没有这样的一些点，在跟路轨的相对关系上说，正在向反方向——从乙地向甲地——移动着?

你觉得这个题目出得荒唐吗?但是事实上这列车的每一个车轮每一瞬间有这种向反方向移动的点。你可知道它们究竟在什么地方吗?

你当然知道火车轮缘上有一个凸出的边。好，那么让我来告诉你，当火车向前行进的时候，这个凸出边的最低一点竟不是向前移动，而是向后移动的!

你觉得奇怪吗?好，那么做完下面这个实验你就明白了。找一个圆形的东西，例如一枚硬币或者一个钮扣，把一根火柴用蜡粘在这圆东西的直径上，让它有长长的一段露出在外面。现在，把这个圆东西放在尺边上的 C 点(图 5)，把它从右向左滚

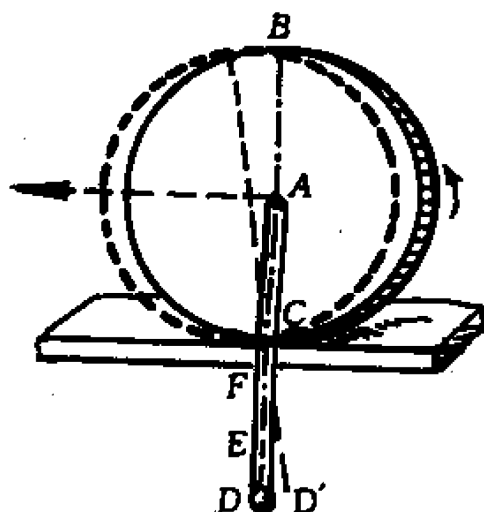


图 5　硬币和火柴的实验。硬币向左方滚去的时候，火柴露在硬币外面的部分 F、E、D 各点却向反方向移动。

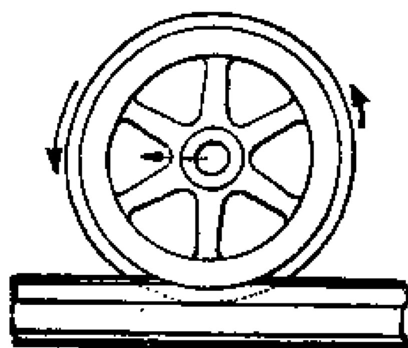


图 6　当火车车轮向左滚动的时候，它的凸出部分下端却向右方(反方向)移动



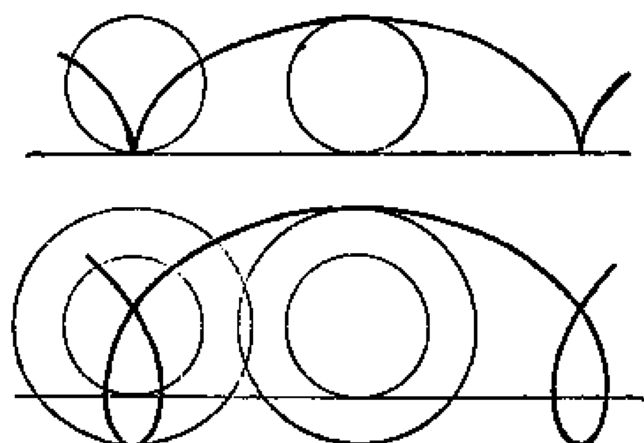


图 7　上图表示滚动车轮上每一点所画出的曲线（摆线），下方表示火车车轮凸出部分各点所画出的曲线

动，你就可以看到火柴的 *F*、*E*、*D* 各点不但没有跟着向前移动，倒相反地向后退去，火柴上离圆东西的边越远的点，在圆东西向前滚动时候倒退的现象也越显著（*D* 点移到了 *D′*点）。

当火车前进的时候，火车的车轮凸出部分的下端也恰好跟我们这个实验里的火柴露出的部分一样，是向反方向移动的。

现在，我说在飞驶着的火车上有一些不是向前而是向后移动的点，你已经不会觉得奇怪了。这个反方向的移动固然一共只延续几分之一秒，尽管在我们的印象里一向都没有这种认识，但是在飞驶的火车上向反方向移动的点终究是有的。这一点，图 6 和图 7 可以给我们很好的解释。

帆船从什么地方驶来

假定有一只舢板正在湖上划行，并且假定图 8 里的箭头 *a* 表示它的行动方向和速度。前面有一只帆船，正在跟舢板垂直的方向上行驶着，箭头 *b* 表示帆船的方向和速度。假如有人问你这

只帆船是从什么地方驶来的，你一定立刻能够指出岸上的 M 点来；但是，假如把这个问题提给坐在舢板上的乘客，那么他们会指出完全另外的一点来。为什么呢？

原因是，舢板上的乘客所见到的帆船行进的方向，并不是跟他们的行动方向垂直的。因为他们并不感到自己本身的运动：他们只觉得仿佛自己是停在原地不动，而周围的一切却用他们一样的速度向反方向在移动。因此，对于他们，帆船不只沿箭头 b 移动，同时还沿着跟舢板行动方向相反的虚线箭头 a 的方向移动(图9)，帆船的这两个运动——实际运动跟视运动——按照平行四边形法则加合起来，结果使舢板上的乘客觉得帆船是沿着用 a 和 b 做两邻边的平行四边形的对角线移动，也正是这个缘故，舢板上的乘客才会认为帆船的出发点不是岸上的 M 点，而是 N 点，照舢板前进方向来说，N 点在 M 点前面(图 9)。

我们在跟着地球沿公转的轨道移动，遇到星体的光线的时候，对于各星体位置的判断，也正犯了舢板乘客判断帆船位置的同样错误。因此，各星体的位置对于我们或多或少有沿地球行动方向向前移了一些的感觉。当然，地球移动的速度跟光速

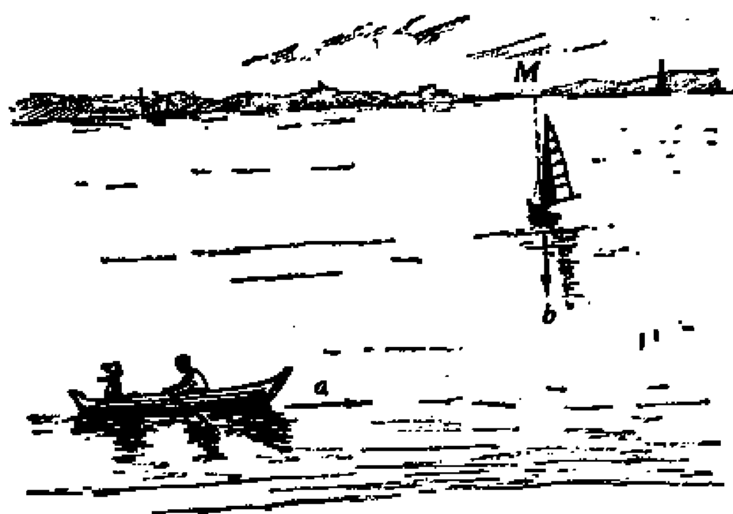


图 8　帆船沿着跟舢板垂直的方向行驶。a、b 两箭头表示速度。舢板乘客看到的帆船是从哪里出发的



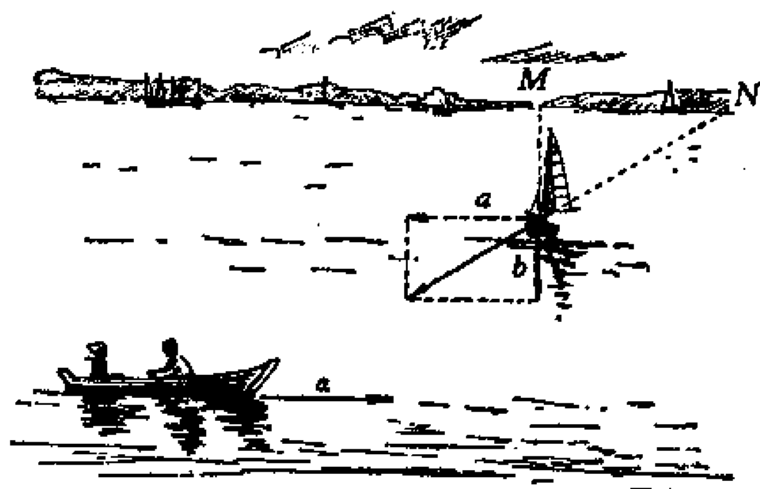


图 9 舢板乘客觉得帆船并没有跟他们的航线在垂直地行驶，却觉得帆船是从 N 点出发，不是从 M 点出发

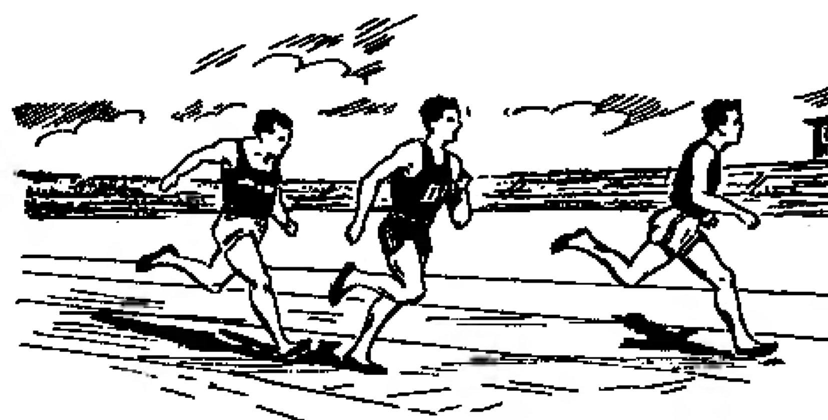
相比是太渺小了(只等于光速的万分之一)；因此，星体的视位移也并不显著，但是这个位移仍旧可以用天文仪器来发现。这个现象叫做光行差。

假如这类问题引起了你的兴趣，那么，请你试就上面所提的帆船的题目把下面几个问题回答一下：

(1)对于帆船上的乘客，他们觉得舢板正向什么方向行进?

(2)帆船上的乘客认为这只舢板要划向什么地方去?

要回答这两个问题，应该在 a 线上(图 9)画出速度的平行四边形；这个平行四边形的对角线就表示帆船上的乘客所认为的舢板行驶的方向，以为舢板正在他们面前斜驶，仿佛正预备靠岸一样。



2 重力、杠杆、压力

请站起来

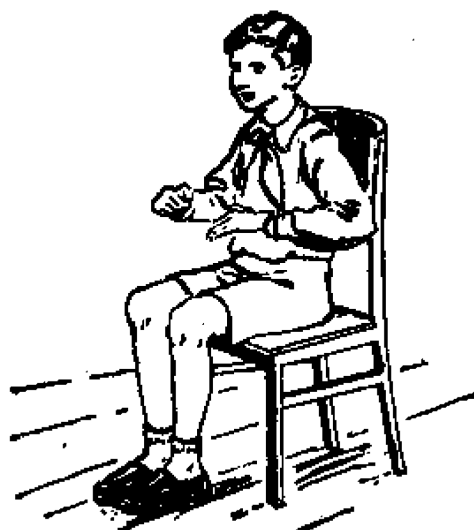


图 10　如果用这样的姿势坐在椅子上，一定不能够站起身来

假如我向你说："请你坐到椅子上去，我可以肯定地说，你一定站不起来，虽然并没有用绳子把你绑在椅子上面。"你一定要认为这话是在开玩笑。

好的。那么，请你像图 10 的样子坐下来，把上身挺直，而且不准把两只脚移到椅子底下去。现在，不准把上身向前倾，也不许改变两脚的位置，请你试试看站起身来。

怎么，不成吧？无论你花多大力气，只要不把上身向前倾或者把两脚移到椅子底下去，你就休想站得起来。

要明白这是怎么一回事，我们得先来谈些关于物体以及人体平衡的问题。一个站立着的物体，只有当那条从它重心引垂下来的竖直线没有越出它的底面的时候，才不会倒下，也就是说，才能够保持平衡。因此，像图 11 的那个斜圆柱体无疑地是要倒下去的；但是，假如它的底面很宽，从它的重心引垂下来的竖直

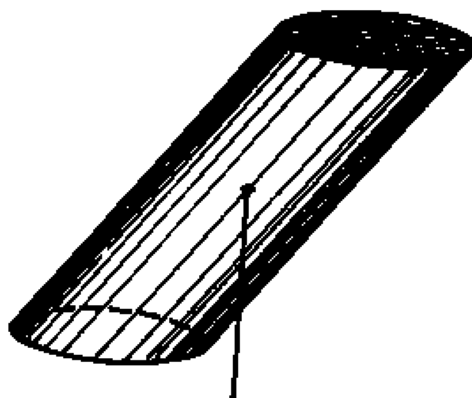


图 11　这样的圆柱体是一定要倒下去的，因为从重心引下的竖直线在底面之外通过



线能够在它的底面中间通过的话，那么这个圆柱体就不会倒下了。在比萨和波伦亚的所谓“斜塔”以及在阿尔汉格尔斯克的所谓“危楼”（图 12），虽然都已经相当倾斜，却并没有倒下来，正就是因为从它们重心引下的竖直线并没有越出它的底面的缘故（当然还有次要的原因，那就是这些建筑物的基石都是深埋在地面以下的）。

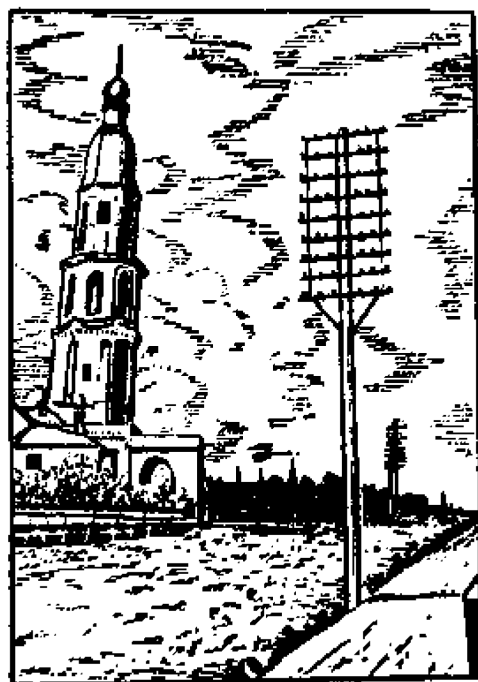


图 12　阿尔汉格尔斯克的“危楼”(一张旧时的照片)

人在站立着的时候，也只在从他的重心引下的竖直线保持在两脚外缘所形成的那个小面积以内的时候才不会跌倒（图 13）。因此，用一只脚站立是比较困难的；而在钢索上站立就更加困难：这是因为底面太小，从重心引下的竖直线很容易越出它的底面的缘故。你可曾注意到老水手们走路时候的古怪姿势吗?他们一生都在摇摆不定的舰船上度过，那儿从重心引下的竖直线每秒钟都有可能越出两脚之间的面积的范围，为了不至于跌倒，老水手都习惯把他们的身体的底面(就是两脚之间的面积)尽可能放大。这样他们才可能在摇摆的甲板上立稳；自然，他们这种走路的方法也沿用到陆地上来了。



图 13　当你站立的时候，从你重心引下的竖直线必然在两脚外缘所形成的小面积里通过

我们还可以举出一些反面的例子，就是平衡增进了人体姿势的美观。你可曾注意到，一个在头上顶着重物走路的人，他的姿势是多么匀称！大家也都见过头上顶着水壶的女人的优美姿态。她



们头上顶着重物，因此一定要使头部和上身保持笔直的状态，否则，只要有一点偏斜，从重心(这时候重心的位置比一般人提高了许多)引下的竖直线就会有越出底面范围的危险，那么人体的平衡就要给破坏了。

现在，让我们还是回到方才坐定以后站起身来的那个试验上来。

一个坐定的人，他的身体的重心位置是在身体内部靠近脊椎骨的地方，比肚脐高出大约20厘米。试从这一点向下引一条竖直线，这条竖直线一定通过椅座，落在两脚的后面。但是，一个人要能够站起身来，这条竖直线却一定要通过两脚之间的那块面积。

因此，要想站起身来，我们一定要把胸部向前倾或者把两脚向后移。把胸部向前倾，是要把重心向前移；把两脚向后移，却是使原来从重心引下的竖直线位置能够在两脚之间的面积之内。我们平常从椅子上站起身来的时候，正就是这样做的。假如不准许我们这样做的话，那么，你已经从方才的实际经验里体会到，想从椅子上站起身来是不可能的。

步行和奔跑

你对于自己每天都要做千万次的动作，应该是很熟悉的了。一般人都在这样想，但是这种想法并不一定正确。最好的例子就是步行和奔跑。真的，我们还有什么比对这两种动作更熟悉的呢?但是，想要找到一些人能够正确地解答我们在步行和奔跑的时候究竟怎样在移动我们的身体，以及步行和奔跑究竟有些什么不同，恐怕也并不太简单。现在我们先来听一听生理学家对于步行和奔跑的解释。我相信，这段材料对于大多数的



读者，一定是很新鲜的。

假定一个人正在用一只脚站立着，而且假定他用的是右脚。现在，假定他提起了脚踵，同时把身体向前倾[1]。这时候，从他的重心引下的竖直线自然要越出脚的底面的范围，人也自然要向前跌倒；但是这个跌倒还没有来得及开始，原来停在空中的左脚很快移到了前面，并且落到了从重心引下的竖直线前面的地面上，使从重心引下的竖直线落到两脚之间的面积中间。这样一来，原来已经失去的平衡恢复了，这个人也就前进了一步。

这个人自然也可以就是这样停留在这个相当吃力的状态。但是假如他想继续行进，那么他就得把身体更向前倾斜，把从重心引下的竖直线移到支点面积以外，并且在有跌倒倾向的同时，重新把一只脚向前伸出，只是这一次要伸的不是左脚，而是右脚——于是又走了一步，就这样一步一步走下去。因此，步行实际上是一连串的向前倾跌，只不过能够及时把原来留在后面的脚放到前面去支持罢了。

让我们把问题看得更深入一些。假定第一步已经走出了。这时候右脚还跟地面接触着，而左脚却已经踏到了地面。但是只要所走的一步并不太短，右脚脚踵应该已经抬起，因为正是由于这个脚踵的提起，才使人体向前倾跌而破坏了平衡。左脚首先是用脚踵踏到地面的。当左脚的整个脚底已经踏到地面的时候，右脚也完全提到空中了，在这同时，左脚的膝部原来略略

[1] 这时候步行的人因为要向前踏开一步，向支点增加了原来体重以外大约 20 千克的压力。因此一个步行的人对于地面所施的压力要比一个站立的人大。

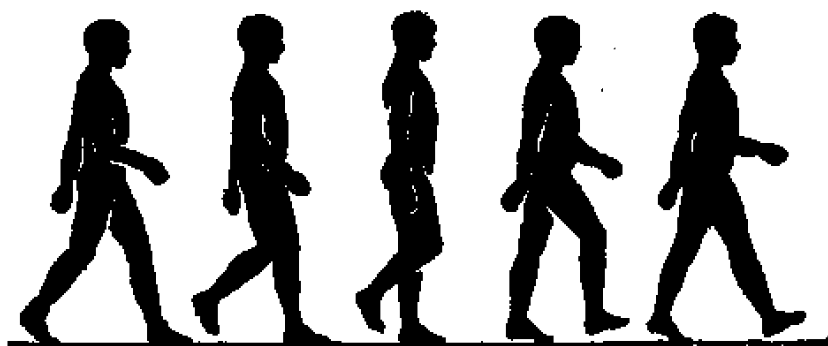


图 14　人怎样步行。步行的时候人体的连续动作

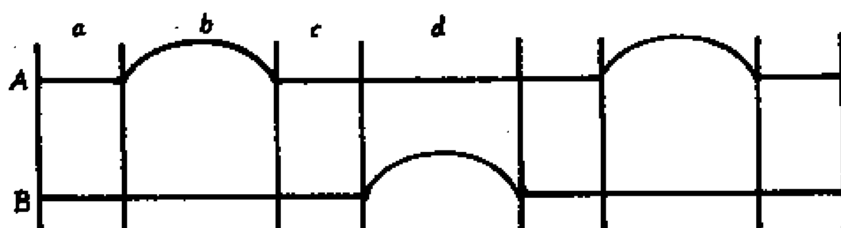


图 15　步行时候两脚动作的图解

上面的 A 线表示一只脚，下面的 B 线表示另外一只脚。直线表示脚和地面接触的时间，弧线表示脚离开地面移动的时间。从图上可以看出，在一段时间 a 里，两脚都是站在地上的；在时间 b 里，A 脚在空中，B 脚继续贴地；在时间 c 里两脚又重新着地。路走得越快，a、c 两段时间也就越短（请跟图 17 的奔跑图解比较）

弯曲的，由于大腿股四头肌的收缩就伸直了，并且在这一瞬间成竖直状态。这使得半弯曲的右脚可以离开地面向前移动，并且跟着身体的移动把右脚踵恰好在走第二步的时候放下。

接着，那左脚先是只有脚趾踏着地面，立刻就全部抬起到空中，照样地复演方才那一连串的动作。

奔跑和步行的不同，在于原是站立在地上的脚，由于肌肉的突然收缩，就强力地弹了起来，把身体抛向前方，使身体在这一瞬间完全离开地面。接着身体又落到地上，但是已经由另外一只脚来支持了，这只脚当身体还在空中的时候已经很快地移到了前方。因



图 16　人怎样奔跑。奔跑的时候人体的连续动作
(注意奔跑的时候有双脚完全离地没有支点的瞬间)

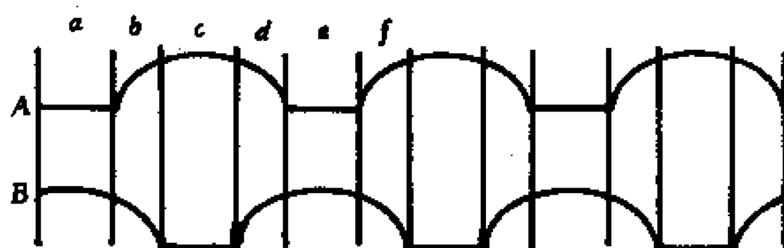


图 17　奔跑时候的两脚动作的图解(请跟图 15 比较)
从图上可以看出，奔跑的时候有两脚都是悬空的瞬间
(*b*、*d*、*f*)。奔跑跟步行不同的地方就在这里

此，奔跑是一连串的从一只脚到另一只脚的飞跃。

至于在平路上步行时候所消耗的能，它并不像过去想象那样的等于零：步行的人的重心每走一步都要提起几厘米。可以计算得出，在平路上步行时候所做的功，大约等于把步行的人的身体提高到跟所走距离相等的高度时候所做的功的 1/15。

从开动着的车子里下来,要向前跳吗

这个问题，无论你把它向什么人提出，一定会得到相同的答案，“根据惯性定律，是应该向前跳的”。但是，你不妨请他把这

个道理说得更详细些，问他：惯性对于这个问题究竟起着什么作用?我们可以预言，这位朋友会肯定地滔滔不绝地开始叙述；但是，只要你不去打断他的话头，他会很快就自己也迷惑起来了，他的结论竟是，由于惯性的存在，下车时候相反地竟是要向跟车行相反的方向跳的。

真的，事实上，惯性定律在这个问题上只起着次要的作用，主要的原因却是在另外一点上。假如我们把这主要的原因忘了，那么我们就真会得到这样的结论：应该是向后跳而不是向前跳了。

假设你一定得在半路上从车子里跳下来，这时候会发生些什么情况呢?

当我们从一辆行驶着的车子上跳下的时候，我们的身体离开了车身，却仍旧保持着车辆的速度(就是要依惯性作用继续运动)要想继续前进。这样看来，当我们向前跳下的时候，我们当然不但没有消除了这个速度，而且还相反地把这个速度加大了。

单从这一点看，我们从车子上跳下的时候，是完全应该向跟车行相反的方向跳下，而绝对不是向车行的方向跳下。因为，如果向后跳下，跳下的速度跟我们身体由于惯性作用继续前进的速度方向相反，把惯性速度抵消一部分，我们的身体才可以在比较小的力量作用之下跟地面接触。

事实上呢，无论什么人，从车上跳下的时候，总是面向前方的，就是向行车的方向跳下的。这样做也确实是最好的方法，是由不知道多少次的经验所证明了的；这使我们坚决劝告读者在下车的时候不要做向后跳跃的尝试。

那么，究竟是怎么一回事呢?

我们方才那套“理论”跟事实所以有出入，毛病只是出在方才的解释只说了一半，没有说完。在跳下车子的时候，无论我们面向车前还是面向车后，一定会感到一种跌倒的威胁，这



是因为两只脚落地之后已经停止了前进，而身体却仍旧继续前进的缘故[1]。当你向前方跳下的时候，身体的这个继续前进的速度，固然要比向后跳下的更大，但是，向前跳下还是要比向后跳下安全得多。因为向前跳下的时候，我们会依习惯的动作把一只脚提放到前方(如果车子速度很快，还可以连续向前奔跑几步)，这样就会防止向前的跌倒。这个动作我们是非常习惯的，因为我们平时在步行的时候都在不断地这样做着：在上一节中，我们就已经说过，从力学的观点上说，步行实际上就是一连串的向前倾跌，只是用一只脚踏出一步的方法阻止着真正跌倒下去。假如向后倾跌，那么就不能够用踏出一步的方法来阻止跌倒，因此真正跌倒的危险就大了许多。最后，还有一点也很重要：即使我们真的向前跌倒了，那么，因为我们可以把两只手撑住地面，跌伤的程度也要比向后仰跌轻得多。

所以，在下车的时候向前跳跃比较安全，它的原因与其说是受到惯性的作用，不如说是受到我们自己本身的作用。自然，对于不是活的物体，这个规则是不适用的：一只瓶子，如果从车上向前抛出去，落地的时候一定要比向后抛出去更容易跌碎。因此，假如你有必要在半路上从车上跳下，而且还要先把你的行李也丢下去，应该先把你的行李向后面丢出去，然后自己向前方跳下，但自然最好是不要在半路上跳车。

有经验的人——例如电车上的售票员和查票员——时常这样跳：面向着车行的方向向后跳下。这样做可以得到两重便利：一来减少了由于惯性给我们身体的速度，另外又避免了仰跌的危险，因为跳车的人的身体是向着车行的方向的。

---

〔1〕在这种情形下面的跌倒也可以从另外一个观点来解释(见本书著者的《趣味力学》第三章“什么时候‘水平’线不水平?”一节)。

顺手抓住一颗子弹

根据报载，在帝国主义之间的第一次大战的时候，一个法国飞行员碰到了一件极不寻常的事件。这个飞行员在2 000米高空飞行的时候，发现脸旁有一个什么小玩意儿在游动着。飞行员以为这是一只什么小昆虫，敏捷地把它一把抓了过来。现在请你想一想这位飞行员的惊诧吧，他发现他抓到的是……一颗德国子弹!

你知道敏豪生伯爵[1]的故事吗?据说他曾经用两只手捉住了正在飞的炮弹，法国飞行员的这个遭遇跟这个故事简直太相像了。

然而在法国飞行员的这个遭遇里，却没有什么不可能实现的事情。

这是因为，一颗子弹并不是始终用800～900米每秒的初速度飞行的。由于空气的阻力，这个速度逐渐减低下来，而在它的路程终点(跌落前)的速度却只有40米每秒。这个速度是普通飞机也可以达到的。因此，很可能碰到这种情形：飞机跟子弹的方向和速度相同。那么，这颗子弹对于飞行员来说，它就相当于静止不动的，或者只是略略有些移动。那么，把它抓住自然没有丝毫困难了——特别是当飞行员戴着手套的时候，因为穿过空气的子弹跟空气摩擦会产生近100摄氏度的高温。

[1] 敏豪生伯爵是德国一个著名故事《敏豪生奇遇记》里的主人公。



西瓜炮弹

如果说一颗子弹在一定条件下可以变得对人没有危害的话，那么，相反的情形也同样可能存在：一个“和平”的物体用不大的速度投掷出去，却可以起到破坏的作用。1924年举行过一次汽车竞赛。沿途的农民看到汽车从身旁飞驰过去，为了表示祝贺，向车上乘客投掷了西瓜、香瓜、苹果。这些好意的礼物竟起了很不愉快的作用：西瓜和香瓜把车身砸凹、弄坏，苹果呢，落到乘客身上，造成了严重的外伤。这个理由很简单：汽车本身的速度加上投出西瓜和苹果的速度，就把这些瓜果变成了危险的、有破坏能力的炮弹。我们不难算出，一颗10克的枪弹发射出去以后所具有的能，跟一个4千克的西瓜投向每小时行驶120公里的汽车所产生的能不相上下。

自然，西瓜的破坏作用是不能跟子弹相比的，因为西瓜并不像子弹那样坚硬。

等到高空大气层(所谓平流层)里的高速度飞行实现，飞机已经具备3 000公里每小时的高速度，也就是有了跟子弹一样的速度的时候，每一个飞行员就都会有机会碰到方才所说的情形，就是在这种飞机飞行的路上，每一个落在这架高速飞机前面的物体，对于这架飞机都会变成有破坏力的炮弹。从另外一架即使不是迎面飞来的飞机上偶然跌落下来的一颗子弹，如果跌到这架飞机上，这颗跌下的子弹碰到这架飞机时候的力量，跟从机枪里射到飞机上的一样。这道理很明显，子弹跌到这架飞机上跟从机枪发射出来，它们的相对速度相等(飞机和机枪子弹的速度都跟800米每秒相近)，因此跟飞机接触时候的破坏后果也一样。

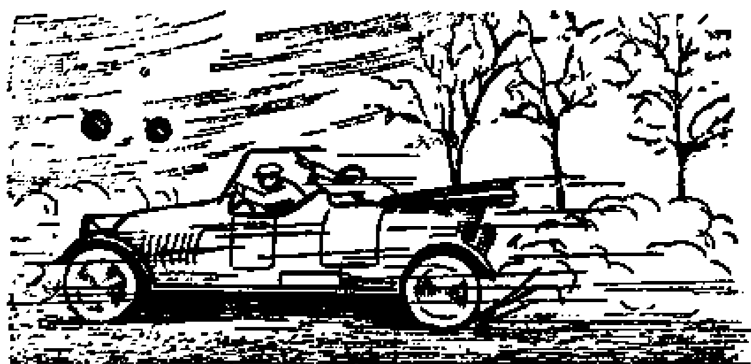


图 18　向很快开过来的汽车投掷出去的西瓜，就像一颗"炮弹"

相反地，假如一颗从机枪射出的子弹，在飞机后面用跟飞机相同的速度前进，这颗子弹对于飞机上的飞行员，大家已经知道是没有危害的。两个物体向相同方向用几乎相等的速度移动，在接触的时候是不会发生什么撞击的，在 1935 年，有一位司机就曾经十分机敏地运用过这一个道理，因而避免了一次就要发生的撞车惨剧。事情的经过是这样的：在这位司机驾驶的列车前面，有另外一列列车在前进。那前面的列车由于蒸汽不足，停了下来，机车把一部分车厢牵引到前面的车站去了，丢下了 36 节车厢暂时停在路上。但是这些车厢由于轮后没有放置阻滑木，竟沿着略有倾斜的铁轨用 15 公里每小时的速度向后滑溜下来，眼看就要跟他的列车相撞了。这位机警的司机发现了问题的严重性，立刻把自己的列车停了下来，并且向后退去，逐渐增加到也是 15 公里每小时的速度。由于他这样机智的办法，这 36 节车厢终于平安地承接在他的机车前面，没有受到丝毫损伤。

根据同样的道理，人们造出了在行进的火车上也能方便写字的装置。原来，在火车上写字困难，只是因为车轮滚过路轨接合缝时候的震动并不同时传到纸上和笔尖上。假如我们有办法使纸张和笔尖同时接受这个震动，那么它们就会是相对地静止着，这样在火车行进的时候写字就会没有一点困难了。

要使笔尖和纸张同时受到震动，可以利用图 19 的装置。图



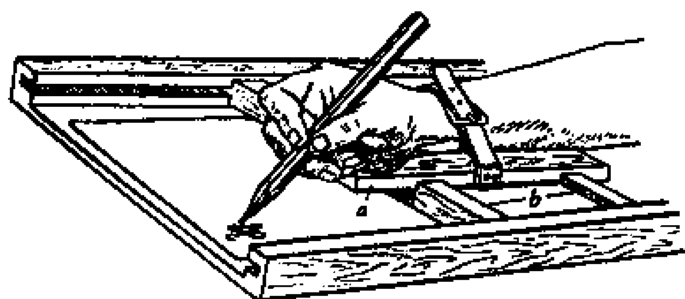


图 19　在行进的火车上使得写字方便的装置

上拿钢笔的右手由一条小皮带系紧在木板 *a* 上，这块木板 *a* 可以在木板 *b* 的槽里向左右移动，木板 *b* 可以放在车厢里小桌上的木座小槽里向前后移动。这里我们可以看出，手是非常活动的，可以一个字接一个字、一句接一句地写下去；这时候，木座上那张纸所受到的每一个震动，也同时传到握在手里的笔尖上。这种装置可以使你在火车行进的时候写字跟火车停止的时候一样方便，只是你眼睛看到的纸面上的字迹却在不停跳动着，这是因为你的头部和右手所受到的震动并不在同一时候的缘故。

在台秤的平台上

当你踏上台秤平台上称你的体重的时候，如果想得到正确的结果，你就得一动不动地直立在台秤的平台上。你要是弯一弯腰，好，在你弯腰的一瞬间，台秤立刻就指出重力减少了。为什么呢?这是因为肌肉在上身向下弯曲的同时就把下体向上提升，因此使得向台秤支点所施的压力减轻。相反的，当你把上身伸直的时候肌肉又会使你的下体对于平台所施的压力增加，台秤就会跟着指出重力增加了。

在一架灵敏的台秤上，即使把手举一下，由于使你的手向上举起的肌肉是依附在肩头上的，举手的动作会把肩头以及整个人体向下压，因此台秤平台所承受的压力也跟着增加。现在如果把已经举起的手停在空中，那么就要使相反的肌肉开始动

作，把肩头向上提升，因此人的体重，人体对于台秤支点所施的压力，也就跟着减少了。

相反的，把手放下就会引起体重的减少，等手停稳下来了，体重又会略微增加。

物体在什么地方比较重

地球施向一个物体的吸引力（地球引力）要跟着这个物体从地面升高而减低。假如我们把 1 千克重的砝码提高到离地面 6 400 公里，就是把这砝码举起到离地球中心两倍地球半径的距离，那么这个物体所受到的地球引力就会减弱 1/4，如果在那里把这个砝码放在弹簧秤上称，就不再是 1 000 克，而只是 250 克。根据万有引力定律，地球吸引一切物体，可以看做它的全部质量都集中在它的中心（地心），而这个引力跟距离的平方成反比。在上面这个例子里，砝码跟地心的距离已经加到地面到地心的距离的两倍，因此引力就要减到原来的 $1/2^2$，就是 1/4。如果把砝码移到离地面 12 800 公里，也就是离地心等于地球半径的 3 倍，引力就要减到原来的 $1/3^2$，就是 1/9；1 000 克的砝码，用弹簧秤来称就只有 111 克了，依此类推。

这样看来，自然而然会产生一种想法，认为物体越跟地球的核心（地心）接近，地球引力就会越大；也就是说，一个砝码，在地下很深的地方应该更重一些。但是，这个臆断是不正确的：物体在地下越深，它的重力不但不是越大，反而越小了。这现象的解释是这样的：在地下很深的地方，吸引物体的地球物质微粒已经不只是在这个物体的一面，而是在它的各方面。请看图 20。从图上可以看出，那个在地下很深地方的砝码，一方面受到在它下面的地球物质微粒向下方的吸引，另外



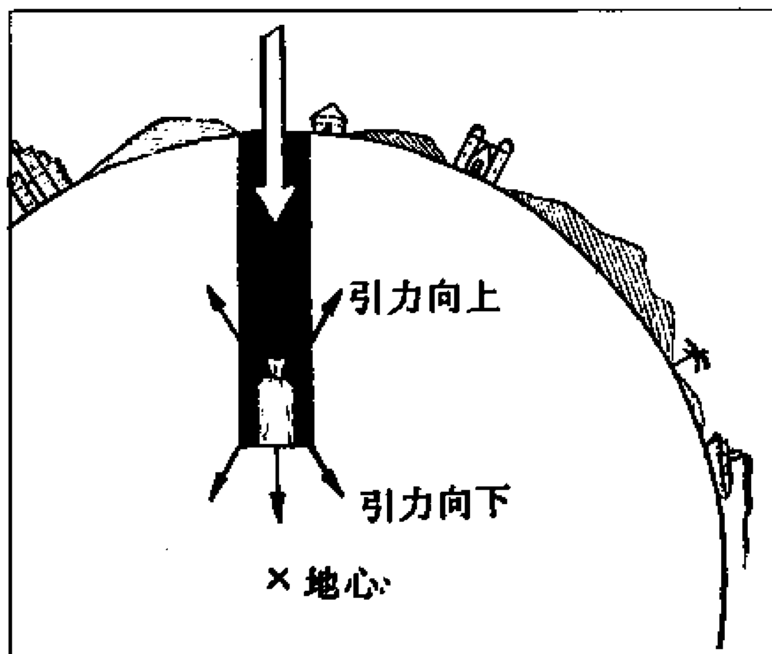


图 20　为什么物体深入地球以后重力会逐渐减小

一方面又受到在它上面的微粒向上方的吸引。这儿我们不难证明，这些引力相互作用的结果，实际发生吸引作用的只是半径等于从地心到物体之间的距离的那个球体。因此，如果物体逐渐深入到地球内部，它的重力会很快减小。一到地心，重力就会完全失去，因为，在那时候，物体四周的地球物质微粒对它所施的引力各方面完全相等了。

所以，物体只是当它在地面上的时候才有最大的重力，至于升到高空或深入地球，都只会使它的重力减小[1]。

〔1〕以上所说的，只是假定地球各部分的密度完全均匀的情形，事实上地球越接近地心的部分，密度越大，因此，物体深入地球的时候，它的重力在最初一小段距离里还会增加一些，以后才逐渐减小。

物体落下时候的重力

你可曾有过这样的经验，比方说坐电梯在开始下落的时候有一种恐惧的感觉?你会有一种仿佛向无底深渊跌下去的不寻常的轻飘飘的感觉。这实际上就是失掉了重力的感觉：在电梯开动的最初一瞬间，当你脚底下的电梯地板已经落了下去，而你却还没有来得及产生同样速度的那一瞬间，你的身体几乎没有压在地板上，因而你的体重也就会非常小。这一瞬间过去以后，你的这个恐惧的感觉停止了，这时候你的身体要用比匀速下落的电梯更快的速度落下去，就对电梯的地板施加压力，因此又恢复了原有的体重。

试把一个砝码挂在一只弹簧秤的钩子上，使弹簧秤连同砝码很快地落下去，注意秤上指示的数值(为了观察方便，可以把一小块软木嵌到弹簧秤的缝里来注意软木的位置变化)。你会看到，在砝码和秤一同落下的时间里，弹簧秤所指示的并不是砝码的全部重力，而只是很小一部分的重力!假如挂着砝码的弹簧秤从高的地方自由落下，而你有办法在落下的过程中观察秤所指示的数值的话，你会发现，这个砝码在自由落下的时候竟是一点重力也没有，弹簧秤所指示的数值是0。

即使是最沉重的物体，当它向下跌落的时候，也会变成仿佛完全没有了重力。这一点也不难解释明白。什么叫做“重力”呢?物体受到的重力就是由于地球的吸引而产生的有时表现为物体对它的悬挂点所施的下拉力或者对它的支点所施的压力。但是，自由落下的物体对弹簧秤并不施加任何下拉力，因为弹簧秤也跟着一同落下。

还在17世纪，奠定力学基础的伽利略就曾经写道：



我们感觉到肩头上有重荷，是在我们不让这个重物落下的时候，但是，假如我们跟我们肩上的重物一起用同样的速度向下运动，那么这个重物怎么还会压到我们呢?这情形就跟我们想用手里的长矛[1]刺杀一个人，而这个人却在跟我们一起用同样的速度奔跑的情形一样。

《炮弹奔月记》

在1865～1870年间，法国小说家儒勒·凡尔纳一部幻想小说《炮弹奔月记》出版了，书里描写了一个不平常的幻想：要把一只装着活人的炮弹车厢送到月球去！这位小说家把他的这个设计写得非常逼真，好像真有其事，使许多读者一定要产生一个问题：这种想法难道就一定不可能实现吗[2]？这个问题谈起来确实是很有趣的[3]。

首先，我们来研究一下，一颗射出的炮弹，究竟有没有可能——即使只是在理论上——永远不跌回到地球上来。理论上，这种可能性并不是没有的。真的，为什么一颗水平射出的炮弹终于要跌回到地球上来呢?这是因为地球吸引着炮弹而弯曲了它的路线的缘故；因此炮弹并没有能够作直线飞行，而是沿曲线向着地球行进，早晚要跟地面碰头的。地球表面固然也是弯曲的，但是炮弹的路线弯曲得更厉害。假如把炮弹行进的路线改变得少弯曲

[1] 当然，长矛只准拿在手里，不准向前掷出。

[2] 1969年7月16日，美国发射"阿波罗11号"，同年7月20日，人类首次登上月球。

[3] 现在，在发射了人造地球卫星和头几个宇宙火箭以后，我们可以说，宇宙旅行利用的将是火箭，而不是炮弹。但是，火箭的最后一级工作完了后，支配火箭运动的原理跟炮弹是一样的。因此，本节内容仍然适用。

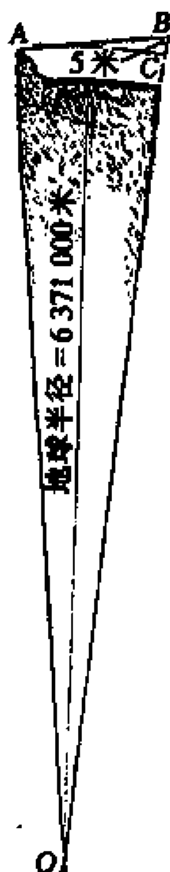


图21　永远射离地球的炮弹速度计算

一些，使它跟地球表面弯曲的程度一样，那么这种炮弹就会永远不跌回到地面上来！它要依地球的同心圆绕着地球运动。换句话说，它好像变成地球的卫星，变成第二个月球了。

但是，如果想使射出的炮弹沿着比地球表面弯曲得更少的曲线行进，该怎么办呢？这个答案很简单，只要使射出的炮弹有足够的速度就可以了。请注意图21，那儿画着地球的一部分截面。我们的大炮安放在山峰上的 A 点。从这门大炮水平射出的炮弹，假如没有地球引力的影响，在1秒钟以后应该到达 B 点。但是地球引力改变了这种情形，在地球引力的作用下，炮弹在射出1秒钟以后到达的不是 B 点，而是比 B 点低5米的 C 点。5米这个数目，是每个自由落下的物体在真空里受到地球引力的作用在第一秒钟里所落下的距离。假如这颗炮弹在降落这5米以后和地面的距离，恰好跟它在 A 点的时候和地面的距离相等，那就表示它正沿着地球的同心圆在飞着。

现在我们只剩下求出 AB 线段的长短（图21），也就是说，求出炮弹在1秒钟里沿水平方向所走的距离；这样我们就可以知道，炮弹应该用每秒钟所走多少公里的速度发射出去才可以使它不跌回到地面上来。这个计算并不麻烦，可以从三角形 AOB 求出：在这个三角形里，OA 是地球半径（大约等于6 371 000米）；$OC=OA$，$BC=5$ 米；因此 $OB=6\ 371\ 005$ 米。根据勾股弦定理，得

$$\overline{AB}^2=(6\ 371\ 005)^2-(6\ 371\ 000)^2$$

把上式解出来，得 AB 大约等于8 000米或8公里。



这样，假如没有阻止物体运动的空气，那么，从大炮里用8公里每秒的速度射出的炮弹就永远不会落回到地面上来，而是绕着地球转圈子，就像一颗卫星一样。

那么，假如我们能够使炮弹从大炮里用比8公里每秒更大的速度射出去，它会飞到什么地方去呢?天体力学证明，当速度是8公里每秒以上，9公里每秒，甚至10公里每秒的时候，炮弹从炮筒射出以后要绕地球走出椭圆的路线，初速度越大椭圆越伸长。当炮弹速度在11公里每秒或者大于11公里每秒的时候，炮弹所走出的路线已经不再是椭圆，而是不封闭的曲线"抛物线"或"双曲线"，永远离开地球了(图22)。



图22　用8公里每秒或大于8公里每秒的初速度射出的炮弹的命运

现在，我们已经看到，在理论上，乘坐在用高速度射出去的炮弹里到月球去旅行这一件事情，不是不可思议的。[1]

儒勒·凡尔纳怎样描写他的月球旅行

凡是读过方才提到的儒勒·凡尔纳那部小说的人，一定很愿意回味书里描写的炮弹飞过地球与月球的引力相等的那一点时的有趣情形。那儿发生了简直像童话里一样的事情：炮弹里的一

[1] 但是这儿却会碰到另外一种性质的困难。对于这个问题，本书的后部分，有比较详细的说明。

上面这一段讨论，是假定大气对于炮弹的行进不起阻碍的作用，事实上，大气阻力的存在使得这样的高速度更不容易得到。

切东西都失去了重力，而那些乘客，只要一跳就会悬空不落下来了。

这段描写是完全正确的，但是这位小说家忽略了一点，就是这样的情形也应该在这个引力相等的一点以前和以后发生。我们不难在这里证明，炮弹里的乘客和一切东西，在炮弹刚一飞出的时候就已经完全没有了重力。

看起来这一点仿佛叫人难以相信，但是我想你细细一想，一定会奇怪自己为什么对于这样大的疏忽当时竟一点也没有觉察到。

我们仍旧拿儒勒·凡尔纳的小说来做例子。无疑，你们一定没有忘记“炮弹车厢”里的乘客怎样把那只狗的尸体丢到车厢外面去，以及他们发现那尸体并没有向地面跌落而是继续跟车厢一同前进的时候那种惊奇的情形。这位小说家正确地描写了这个现象，而且给这个现象作了正确地解释。确实，大家都知道，所有物体在真空里都是用同样的速度落下：地球引力使所有物体得到了相同的加速度。在现在这一种情形下，炮弹车厢和狗的尸体在地球引力的作用下，自然应该产生相同的落下的速度(相同的加速度)；或者，要正确地说，它们从炮筒射出的时候所得到的速度，应当在重力的作用下同样地减低。于是，炮弹车厢和狗的尸体在行进路上的每一点上，速度应该始终是完全相同的。因此，从炮弹车厢里投掷出去的狗的尸体，会继续跟着车厢行进，一步也不落后。

但是，这位小说家对于下面一点却没有想到：假如狗的尸体在炮弹车厢外面不会向地面跌落，那么，为什么在车厢里面却会跌落呢?无论它在车厢里面或者外面，它所受到的作用的力都是相同的呀!因此，狗的尸体即使悬空放在车厢里面，它也应该停留在空中：它有跟炮弹车厢完全相同的速度，因此，在跟车厢的相对关系上，它是停留在静止状态中的。

这个道理，对于狗的尸体适用，对于炮弹车厢里的乘客和



所有东西也适用：在行进路上的每一点上，它们都跟炮弹车厢有相同的速度，因此它们即使停留在没有什么支持的地方，也就不应该落下。原来是放在车厢地板上的一把椅子，可以四脚朝天地放到车厢的天花板下面不会跌“下”来，因为它要跟着天花板继续向前行进。而乘客呢，也可以“头向下”地坐到这张椅子上，毫不感到有要跌下来的威胁。真的，有什么力能够使他跌下来呢?因为，假如他跌了下来的话，那就等于说炮弹车厢在空间行进得比乘客更快(否则的话，椅子是不会向地板接近的)。而这是不可能的，因为我们知道，炮弹车厢里的一切东西，都跟炮弹有相同的加速度呀。

这一点，小说家没有注意到：他以为在自由行进的炮弹车厢内部的物体，仍旧要压向它们的支点，和炮弹车厢静止不动时候的情形一样。儒勒·凡尔纳忽略了一件事，就是，物体所以向支点施加压力，只是因为它的支点是静止不动的，或者虽然在动但不是用同样速度在动；假如物体和它的支点在空间用相同的加速度运动，那么它们就不可能彼此相压了。

这样，我们的乘客从旅行开始的最初瞬间起，就已经没有一点重力，而能够自由地在炮弹车厢里的空中停留；同样，炮弹车厢里的所有东西也应该立刻变成完全没有重力的了。根据这个特点，炮弹车厢里的乘客可以确定，他们是在空间很快地前进着呢，还是一动不动地停留在大炮筒里。但是我们的小说家却说，乘客在他们的天空旅行开始以后半小时，还在对一个问题解决不了，就是：他们是在飞行着呢，还是还没有飞出?

“尼柯尔，我们可是在飞着吗?”

尼柯尔和阿尔唐面面相觑，他们并没有感觉到炮弹的震动。

“真的!我们究竟是在飞着吗?”阿尔唐重复说。

“会不会是一动不动地停在佛罗里达的地面上?”

尼柯尔问。

"还是在墨西哥湾的海底下?"米歇尔加了一句。

像这一类疑问从海轮上的乘客发出是可能的，但是对于自由行进的炮弹车厢里的乘客，发出这种疑问是没有意义的：海轮上的乘客是仍旧保持他们的重力的，但是炮弹车厢里的乘客却不可能不发现他们已经变成完全没有重力的人了。

在这一个幻想的炮弹车厢里，可以看到多少奇怪的现象啊!这是小巧玲珑的一个世界：这儿，一切东西都丧失了重力；这儿，一切东西从手里放开以后，仍旧停留在原来的位置；这儿，一切东西在随便什么情况都会保持着平衡；这儿，打翻了的瓶子也不会有水流泻出来……这一切，《炮弹奔月记》的作者都忽略了，而这些奇怪的现象本来可以给我们这位小说家提供多么广阔的写作材料呀!

用不正确的天平进行正确的称量

请想想看，要想得到正确的称量，什么东西最重要，是天平还是砝码?

假如你的回答是两种东西同样重要，那你就错了：你可以用一架不正确的天平做出正确的称量，只要你手头有正确的砝码。用不正确的天平进行正确的称量，有几种方法，我们只来谈谈里面的两种。

第一种方法是俄罗斯的化学家门得列耶夫所提出的。第一步，把一个重物放到天平的一只盘上——什么重物都可以，只要它比要称的物体重一些就好。然后把砝码放在另外一只盘上，使天平的两边平衡。现在，把要的物体放到放砝码的盘



上，从这只盘上逐渐把一部分砝码拿下来，使天平恢复平衡。这样，拿下的砝码的质量，自然就等于要称的物体的质量，因为就在这同一只天平盘上，拿下的砝码现在已经由要称的物体代替了，可知它们是有相同的质量的。

这个方法一般叫做“恒载量法”，对于需要一连串称量几个物体的时候特别适用，那原来的重物一直放在一只盘里，可以用来进行全部的称量。

另外一种称量的方法是这样的：把要称的物体放到天平的一只盘上，另外拿些沙粒或铁砂加到另外一只盘上，一直加到两边平衡。然后，把这物体拿下(沙粒别去动它)，逐渐把砝码加到这只盘上，加到两只盘重新恢复平衡为止。于是，盘上砝码的质量自然就是要称的物体的质量了。这个方法叫做“替换法”。

方才说的是天平，那么，弹簧秤只有一个秤盘，要怎么办呢?很简单，也可以采用同样简单的方法，假如你手头除掉弹簧秤以外，还有一些正确的砝码的话。这儿用不到沙粒或铁砂，把要称的物体放到秤盘上，把弹簧秤所指示的重力记下。然后，把物体拿下，逐渐加上砝码，一直到弹簧秤指出同样的重力为止。这些砝码的重力，自然就等于要称的物体的重力了。

比自己更有力量

你的一只手能够提起多重的东西?假定是100牛顿吧。你以为这100牛顿就表示你手臂肌肉的力量了吗?那就错了：你的肌肉的力量要比这个强得多!例如，请注意你手臂上所谓二头肌(图23)的作用吧。这条肌肉固着在前臂骨这个杠杆的支点附近，重物却作用在这个杠杆的另一端。从重物到支点(就是关

节)间的距离，大约是从二头肌端到支点的 8 倍。这就是说，假如重物为 100 牛顿，那条肌肉所出的拉力就是这个数值的 8 倍。因此，我们的肌肉能够发出的力量相当于我们手臂力量的 8 倍，那么它可以直接提起的重力，就不是 100 牛顿，而是 800 牛顿。

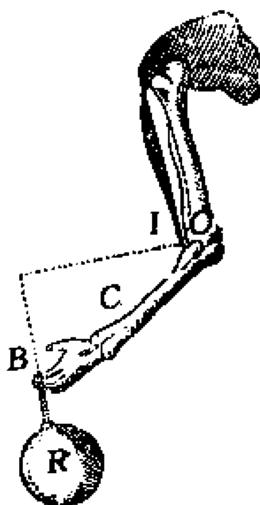


图 23　人体前膊骨 (C) 属于第二类杠杆。作用力 (二头肌) 的作用点在 I 点；杠杆的支点在关节上的 O 点；要克服的阻力 (重物 R) 的作用点在 B 点。BO 的距离(杠杆的长臂) 大约是 IO(杠杆的短臂)的 8 倍

我们有权利毫不夸张地说：每一个人的力量要比他自己所表现出来的强许多倍；也就是说，我们的肌肉可以发出比我们在日常动作里所表现的更加强大的力量。

那么人的手臂这样的构造合理不合理呢?初看仿佛是不合理的——我们在这儿看到的是力的没有代价的损失。然而，让我们想一想那个力学上古老的“黄金法则”：凡是在力量上吃了亏的，在移动距离上一定占了便宜。因此，我们在速度上是占了便宜的，我们两只手的动作就有操纵手的肌肉的动作的 8 倍那么快。动物身体内部肌肉的连结方法，保证了四肢很快地活动，这在动物的生存方面，是比力量更加重要的。我们人类的手脚假使不是这样构造的话，我们就会是行动极慢的动物了。

为什么尖锐的物体容易刺进别的物体

你可曾考虑过这样一个问题：为什么缝衣针能够这样轻易地穿透一个物体?为什么一块绒布或者厚纸板很容易给一根细针穿过，却很难让钝头的钉子穿过?在这两种情形里所作用的力不



都是相同的吗?

是的，力是相同的，但是压强却并不一样。用针穿透的时候，全部力都集中在针的尖端；而用钉子的时候，同样的力却分配在比较大的钉尖面积上。因此，针所施的压强要比钝头钉大得多——这是说我们所用的力假定是完全相同的话。

谁都知道，一把 20 齿耙耙松的土地，要比同样重的 60 齿耙耙得深。为什么呢?这是因为 20 齿耙每一个齿上分配到的力要比 60 齿耙的大的缘故。

当我们谈到压强的时候，在力之外，我们一定要更注意这个力所作用的面积。同样大小的一个力量所产生的压强大小，要看它作用的面积究竟是 1 平方厘米呢，还是集中在 1/100 平方毫米上。

你用滑雪橇能够在松软的雪面上行走，不用滑雪橇就要陷到雪里去。为什么呢?因为用了滑雪橇后身体压力分配在比不用的时候大得多的面积上。假如，举例来说，两只滑雪橇的面积等于我们两只鞋底的 20 倍，那么，用滑雪橇时对于雪面所施的压强，就要比两脚站在雪面上的所施的压强弱，只等于两脚站着所施压强的 1/20。因此，松的雪面能够承受得住滑雪橇上面的人，却承受不住用两脚站着的人。

根据同样的理由，在沼泽地里工作的马，时常要在马蹄上系着特制的“靴子”，来增加马蹄和地面的接触面积，减少沼泽地面所受的压强：这样一来，马蹄就不会陷到沼泽泥淖里去了。在有的沼泽地，连人也是这样做的。

人在薄冰上通过的时候，一定要匍匐爬行，也是为了把自己的体重分配到比较大的面积上。

最后，还有庞大沉重的坦克和装有履带的拖拉机在疏松地面上所以不会陷下去，也仍旧是这个缘故，它们的重力是分配在比较大的支持面积上。8 吨或 8 吨以上装有履带的车辆，每一平方厘米地面的压力不超过 600 克。从这一个观点看来，沼泽

地带应用装有履带的载重汽车，真是很有趣的。这种汽车载了2吨重的货物，加到地面的压强不超过6.0×10^{-4}牛/米^2(每平方厘米约160克)；因此，它能够在沼泽地带以及泥泞或沙漠地区行驶得很好。

像这样支持面积大的情形，在技术上，跟支持面积小的就像针尖的情形一样，是可以好好利用的。

从上面所说的，可知尖端所以容易刺进物体，只是由于力的作用所分配的面积小的缘故。锐利的刀子要比钝刀容易切割东西，也可以用完全相同的理由解释：力量集中在比较小的面积上。

所以，尖锐物体容易刺进或切割物体，只是因为在它们的尖端或锋刃上集中了比较大的压力的缘故。

跟巨鲸相仿

你坐在粗板凳上，会觉得坚硬不舒适，但是，如果坐在同样是木质的可是光滑的椅子上，却觉得很舒适，这是什么缘故呢？还有，为什么睡在由相当硬的棕索编成的吊床上会觉得柔软舒适？为什么睡在钢丝床上不会觉得坚硬难过？

这道理是不难明白的。粗板凳的凳面是平的，我们的身体只有很小一部分面积能够跟它接触，我们的体重只好集中在这比较小的面积上。光滑的椅子的椅面却是凹入的，能够跟人体上比较大的面积相接触，人的体重就分配在比较大的面积上，因此，单位面积上所受到的压力也就比较小。

所以，这儿的全部问题只在压力的分配更均匀。如果我们躺在柔软的床褥上，褥子就变成跟你身体的凹凸轮廓相适应的样子。压力在你身体的底面上分布得相当均匀，因此身体上的每平方厘米面积上，一共只分配到几克的压力。在这种条件



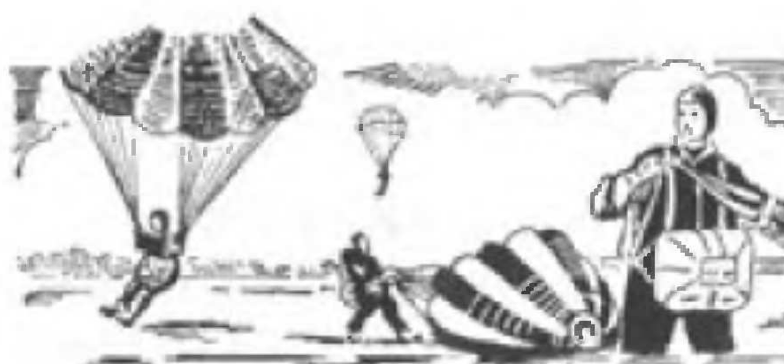
下，你当然就能够躺得非常舒适了。

这个差别，也不难用数字表示出来。一个成年人身体的表面积大约是2平方米或20 000平方厘米。假定我们躺在床上的时候，靠在床上的面积大约有身体表面积的1/4，就是0.5平方米或5 000平方厘米。又假定你的体重大约是60千克(平均数)，那么，每一平方厘米的支持面积上，只要承受0.12牛顿(12克)的压力。但是，如果你是躺在硬板上，那么你的身体只有很少几点跟板相接触，而这几个接触点的总面积一共也不过100平方厘米左右，因此每个平方厘米所承受的就要是五六牛顿，而不是只零点几牛顿了。这差别是很大的，因此，我们的身体立刻就会有“太硬”的感觉。

但是，即使在最硬的地方，我们也可以睡得非常舒适，只要把我们的体重均匀分配在很大的面积上就行。比方说你先睡到一片软泥上，把你身体的形状印在这泥上，然后起来让这片泥土干燥(在干燥以后，泥土会收缩5%～10%，但我们假定这个情形不发生)。当这片泥土变成和石块一样坚硬的时候，你试着再躺到上面去，使你的姿势和泥上留下的形状相合，那么你就会感到跟睡在柔软的鸭绒垫上一样舒适，一点也不觉得硬，虽然实际上你是睡在石头上。你现在的这个情形，恰跟罗蒙诺索夫在一首诗里所写的那传说里的巨鲸相仿：

> 横卧在尖锐的石块上，
> 这些石块的坚硬它可毫不在乎，
> 对于这伟大力量的堡垒，
> 这些只是柔软的泥土。

而你所以不觉得这石头的坚硬，原因却不在于“伟大力量的堡垒”，而只是由于你的体重分配到极大的支持面积上的缘故。



3 介质的阻力

子弹和空气

空气会阻碍子弹的自由飞行，这个事实，是大家都知道的，但是空气的这个阻滞作用究竟大到什么程度，恐怕只有很少人清楚。大多数的人大概有这样的想法，以为像空气这样我们平常几乎不觉察的柔软的介质，对于飞过的步枪子弹一定不会有多大妨碍的。

但是，看一看图 24 就会明白，空气对子弹的确有极大的妨碍。这张图上的大弧线表示没有大气的时候子弹飞行的路线；这颗子弹从枪口射出以后（用 620 米每秒的初速度依 45 度角的方向射出），在空中画出高 10 公里、长 40 公里的很大的弧线。实际上呢，这颗子弹这样射出以后，在空气里只能够画出一共 4 公里长的弧线。在这张图上，这条 4 公里长的弧线跟那条大弧线相比，几乎看不到什么了：空气的阻力竟是这么大！假如没有空气，步枪就可以从 40 公里远的地方把子弹射向 10 公里的高空再落到敌人的头上了！



图 24　子弹在真空里和在空气里的飞行
大弧线表示没有大气时子弹的飞行路线，
左边的小弧线表示在空气里飞行的实际路线



超远程射击

有一次，德国炮兵一门大口径炮以很大的射角射击，意外发现，本来应该落到20公里远的地方的炮弹，竟落到40公里的地方去了。原来，用极大的初速度依大角度向上射出的炮弹，到达了空气稀薄的高空大气层，那儿的空气阻力非常小；炮弹在这阻力极弱的介质里，飞过了极长一段路，最后，陡急地落到地面上。图25清楚地表示了：改变发射角度，会使炮弹飞行路线产生多么大的差别。

这个现象的观察，给德国人奠定了设计从115公里外轰击巴黎的超远程大炮(图26)的基础。这炮制造成功以后，在第一

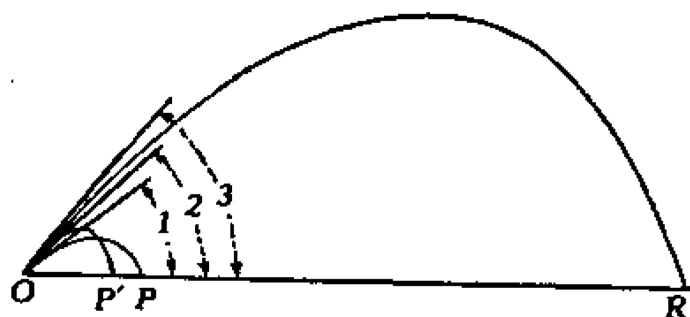


图25 超远程炮的炮弹依不同射角射击出去所达到的距离的变化情形
炮筒射角如果像图上的角1，弹着点是 P；如果是角2，弹着点是 P'；如果是角3，射程就加大了许多倍，因为炮弹已经钻到空气稀薄的平流层里飞行了

次世界大战中，1918年的夏天，德国军队向巴黎发射了300颗以上的炮弹。

关于这种大炮的情况是这样的，这是一根很大的钢筒，全长34米，直径1米；炮筒下部壁厚0.4米。炮重750吨。炮弹重120千克，长1米，直径0.2米。装药要用150千克的火

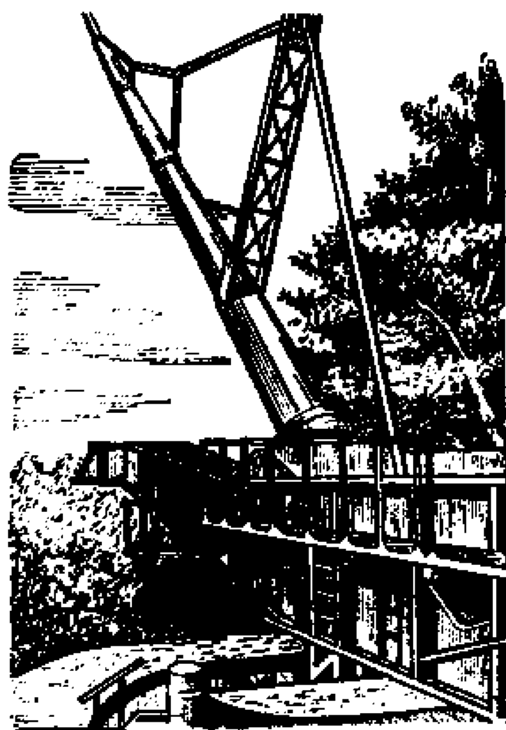


图 26　超远程大炮的外形

药，因此能够把炮弹用 2 000 米每秒的初速度发射出去。炮弹是依 52 度的射角射出去的；炮弹射出去以后，划出了一个很大的弧线，弧线的最高点离地大约 40 公里，早已进了平流层。炮弹从它的阵地射到巴黎——全程 115 公里——所需要的时间是 3.5 分钟，其中有 2 分钟是在平流层里飞行的。

第一座超远程炮的情形就是这样。它是现代超远程炮的祖先。

枪弹（或炮弹）的射出初速度越大，那么空气的阻力也就越大。这个阻力并不跟射出初速度成简单的比例增加，而是增加快得多——是跟初速度的二次方或更高次方成比例地增加的，至于究竟跟几次方成比例，那要看这个速度的大小来决定了。

纸鸢为什么会飞起

你可曾想去解答，当你放纸鸢的时候把手里的线向前牵动，为什么纸鸢会向上飞起？

假如你能够回答这个问题，那么你就可以明白为什么飞机会飞，甚至可以部分了解原始人用的所谓飞旋标的奇怪运动的原理了，因为这一切都是属于同一种性质的现象。原来，正是那给枪弹和炮弹的飞行造成极大阻碍的空气，却使得纸鸢等轻巧



的物体能够飘浮，同时还使得载了几十个乘客的沉重飞机也能够飞行。

为了解释纸鸢上升的原因，让我们来研究那一幅简图（图27）。设 *MN* 线代表纸鸢的截面。当我们牵动纸鸢的线的时候，纸鸢便动起来，由于尾部的重力，就用倾斜的姿势移动着。现在，假定这个运动是从右向左的。让我们用 α 表示纸鸢平面跟水平线之间的倾斜角。现在来看一看，在这个运动中的纸鸢上作用的有哪些力。空气自然是应当阻碍它的行动的，它在纸鸢上施加一个压力。这个压力在图 27 上用箭头 *OC* 表示；因为空气总是依垂直的方向压向一个平面的，*OC* 线也就画成跟 *MN* 垂直。这 *OC* 力可以分解成两个力，描出一个所谓力的平行四边形：结果 *OC* 力就分解成 *OD* 和 *OP* 两个分力。这个 *OD* 力要把纸鸢推向后面，因此就要减低它的原来速度；另一个力 *OP* 呢，却把纸鸢拉着向上，它把纸鸢的重力减轻，而且，假如这个力相当大，就可以把纸鸢的重力全部抵消，使它升起。正是因为这样，当我们把线向前牵动的时候，纸鸢就会向上升起。

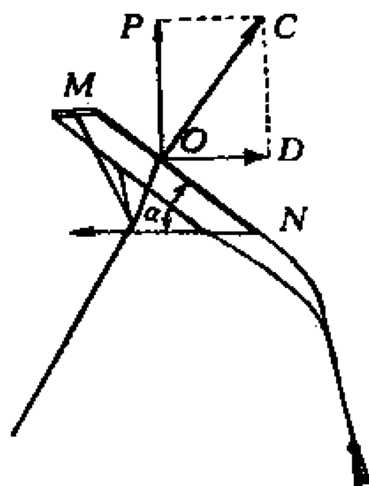


图 27　纸鸢上作用的力量

飞机这东西，其实也就跟纸鸢一样，不同的只是牵动纸鸢的线的是人力，在飞机上的则采用螺旋桨或者喷气发动机来代替了，螺旋桨或者喷气发动机使机身向前移动，结果就跟纸鸢一样，使它向上升起了。当然，这儿只是这个现象的一个极简单的解释；事实上，使得飞机升起的原因还有许多，这些原因将在另一节介绍。[1]

〔1〕参阅本书 16 中的“波浪和旋风”一节。

活的滑翔机

从上面一节可以知道，飞机的构造完全不是像一般人所想象的那样，是从模仿飞鸟得到的，而应该说是从鼯鼠、鼯猴或者飞鱼模仿来的。不过上面所说的几种动物用它们的飞膜不是要向上升起，而只是为了要跳得远——照飞行上的术语来说，只是为了“滑翔下降”。对于它们，力量 OP(图 27)还不够跟它们的体重完全抵消；这个力量只能够减轻它们的体重，因此帮助它们从比较高的地点做长距离的跳跃(图 28)。例如，鼯鼠就能够从一株树的梢上跳到 20 ～ 30 米以外的另一株树的比较低的树枝上。在印度和锡兰等地方，有一种特别大的鼯鼠，这种鼯鼠大约像家猫般大小：当它展开它的飞膜的时候，有半米宽。像这样大的飞膜，能够帮助这种动物跳 50 米这么远，尽管它的身体比较沉重。至于产在菲律宾群岛等地的鼯猴，甚至可以跳到 70 米远。

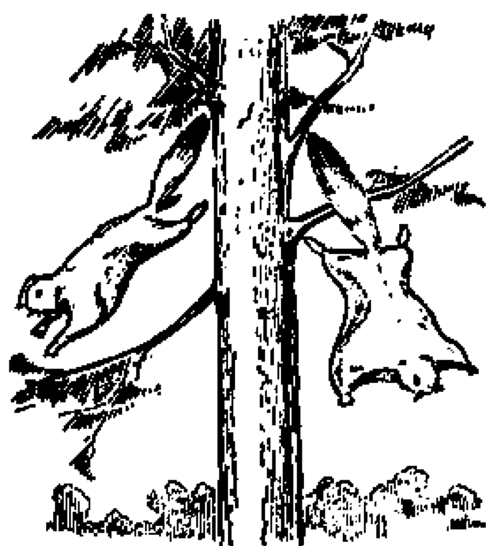


图 28　鼯鼠在滑翔。它们能够从高的地方跳到 20 ～ 30 米远

植物的没有动力的飞行

许多植物也常要靠滑翔的作用散布它们的果实和种子。许多种果实和种子，有的长着成束的毛(例如蒲公英、婆罗门参和棉子，上面都有冠毛)，它们的作用就跟降落伞相仿；有的幼芽保持平面的形状，能够在空中停留。这种植物滑翔机可以在针叶树、槭树、榆树、白桦树、白杨树、椴树和许多伞形科植物等上面看到。

在一部叫做《植物的生活》的书里，我们可以读到下面几段文字：

在没有风的晴天，许多果实和种子被垂直上升的空气流带到相当高的高度，但是在太阳没落以后，一般就又落回到不远的地方。这种飞翔的重要，并不只在于把植物散布得更广，而在于把它们移植到陡峭的斜坡和峭壁上的突出地方及缝隙里，因为它们的种子除此以外没有别的方法能够落到这种地方去，至于水平方向吹来的空气流，会把飘翔在空中的果实和种子带到极远的距离以外。

有些植物的“翅膀”或“降落伞”只在飞行的时候固着在种子身上。有些蓟类植物的种子可以在空气里自由自在地飘浮着，但是一碰到障碍，种子就会跟“降落伞”分离，落到地面上去。这个现象说明了为什么这种植物会时常沿着墙壁和篱笆生长。但是也有一些植物的种子，却是始终跟“降落伞”连在一起的。

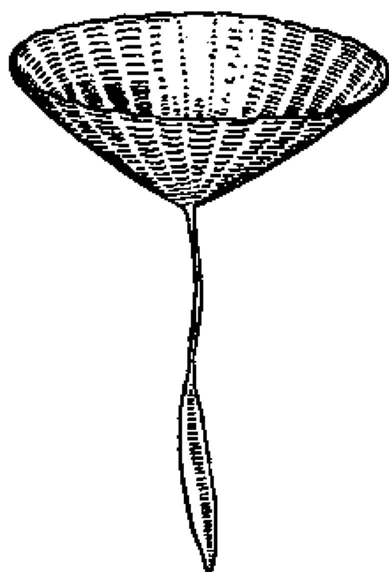


图 29　婆罗门参的果实

图 29 和图 30 表示几种有“滑翔装置”的植物种子。

植物的“滑翔装置”在许多方面甚至比人类的滑翔机还要完善。它们能够带着比本身重力重得多的物体一起升上去。此外，这种植物的“滑翔装置”还有一个特点，它们有自动的稳定装置，比方说你把素馨的种子倒转来让它落下来，它在空中会自动地倒转来把凸出的一面向下；假如这个种子在飞行的时候碰到障碍，它也不会失去平衡，也不跌下，而只是缓慢地向下降落。

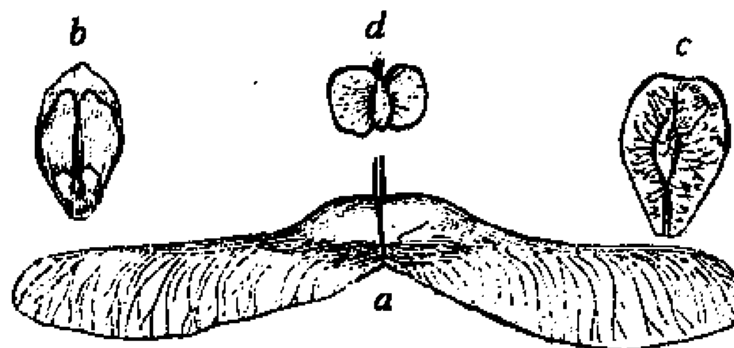


图 30　会飞的植物种子——几种翅果

a. 槭树种　　*b.* 松树种　　*c.* 榆树种　　*d.* 白桦种

迟缓跳伞

写到这里，不由想起那些不打开降落伞就从大约 10 公里高空跳下的跳伞家英勇跳伞的情形。他们在落下了全程的绝大部分之后，才扯动伞环，因此，只有降落的最后几百米是展开了



伞降下的。

许多人认为，不打开伞像石块似的直落下来，就跟在真空里落下一样。假如是这样的话，那么迟缓跳伞的降下时间会比实际所需要的少得多，而最后所达到的速度也会非常大。

但是，空气的阻力妨碍了速度的增加。跳伞员的身体在不打开伞降下时候的速度，只是在跳下以后的最初十几秒钟的时间里，下落最初几百米的一段路上是增加的。空气的阻力是跟着速度的增加而增加的，而且增加得非常显著，很快就使速度不能够再增加上去。因此，这种运动就从加速运动变成匀速运动了。

我们可以用计算的方法，从力学的观点上把迟缓跳伞的大概情形描绘出来。跳伞员在不打开伞落下的时候，加速度大约只在最初的 12 秒钟里是有的，也许还不到 12 秒钟，因人的体重而有不同；在这 10 多秒钟里，跳伞员大约降下 400 ～ 450 米，产生了大约 50 米每秒的速度。以后全部不打开伞降落的路上，便都是用这个速度匀速落下的了。

水滴落下的情形也大概是这样的，不同的只是水滴落下的第一段时间，就是速度仍旧在继续增加的时间，一共只有 1 秒钟，甚至还不到 1 秒钟。因此水滴的最后落下速度，像雨滴的落下速度，就不像迟缓跳伞的那么大。这个速度大约为 2 ～ 7 米每秒，因水滴的大小而不同。[1]

飞 旋 标

这是一种奇怪的武器，是原始人类技术上最完善的制品，

〔1〕雨滴的落下速度，在我著的《趣味力学》一书里有比较详细的说明。

这东西曾经在极长的一段时期里使科学家感到迷惑，没法解释它的道理。这种飞旋标投出以后在空中画出的奇怪的路线，真的要难倒每一个人的（图 31）。



图 31　原始人怎样隐身在隐蔽物后面，使用飞旋标来猎取食物
图上的虚线表示飞旋标的行进路线（没有击中目标）

现在呢，这个飞旋标的飞行理论已经十分详细地研究出来了，因此这种奇术也就不再认为是真的奇术了。在我们这本书里，对于这个现象作深入的研究是不可能的。我只打算告诉读者，这种飞旋标的不平常的飞行路线，是下面三个因素互相作用的结果：

(1)原来投出的作用。

(2)飞旋标的旋转。

(3)空气的阻力。

原始人会把这三个因素联系在一起；他们会熟练地把飞旋标用适当的角度、力量和方向投掷出去，以便得到需要的结果。

其实，我们每个人经过训练也都能够学到这种技巧的。

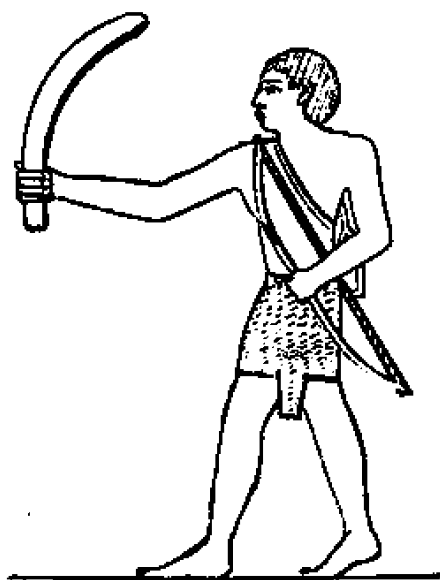


图 32　画着投掷飞旋标的士兵的古埃及图画



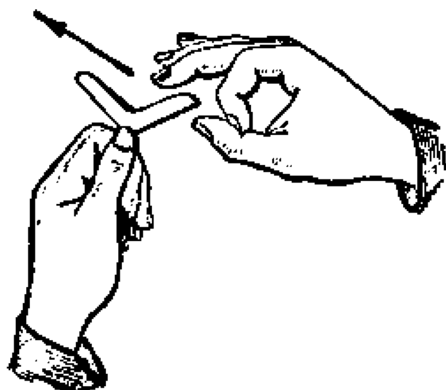


图 33　用纸做飞旋标和施放的方法

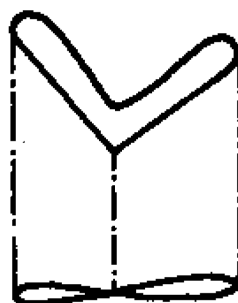
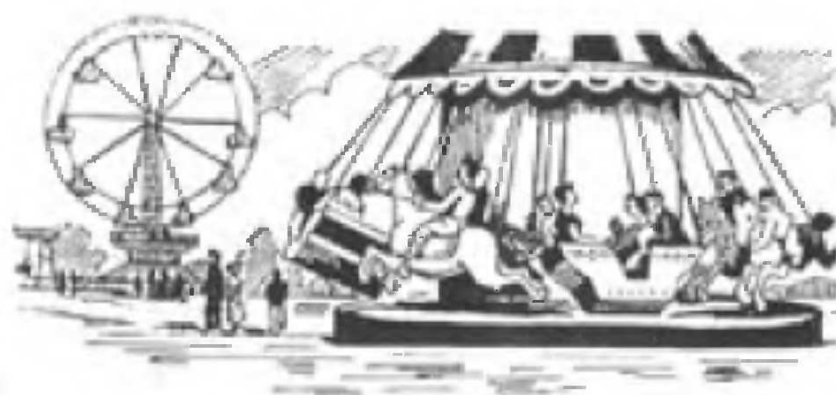


图 34　用纸做飞旋标的另一形状(实际大小)

为了在室内练习方便，我们只好做一只纸的飞旋标来用。这东西可以用卡片纸按图 33 的形状剪出，每边长度大约 5 厘米，宽不到 1 厘米。把这纸飞旋标夹在拇指和食指之间，像图 33 所示，用另外一只手的食指向它弹去，用力的方向是向前但是略略偏向上方。这纸飞旋标就会从你手里飞出，飞了大约 5 米，画出一道圆滑的、有时相当美妙的曲线，而且，假如室内没有东西阻碍的话，就会又落回到你的脚边。

这种飞旋标如果按图 34 的实际大小和形状来做，那么，你的实验就会得到更大的成功。飞旋标最好略微扭曲成螺纹形(图 34 下部)。这样的飞旋标，在你经过相当练习之后，会使它在空中转出复杂的曲线，然后又落回到你的脚边。



4 旋转运动、“永动机”

怎样辨别生蛋和熟蛋

假如你一定要不敲碎蛋壳来判别一个蛋的生熟，你该怎么办呢?力学上的知识能够帮助你解决这个小困难。

这儿问题的关键就在生蛋和熟蛋的旋转情形不一样。这一点就可以用来解决我们的问题。把要判别的蛋放到一只平底盘上，用两只手指使它旋转(图35)。这个蛋如果是煮熟的(特别是煮得很“老”的)，那么它旋转起来就会比生蛋快得多，而且转得时间久。生蛋呢，却甚至转动不起来。而煮得“老”的熟蛋，旋转起来快得使你只看到一片白影，它甚至能够自动在它尖的一端上竖立起来。



图35　怎样把蛋旋转

这两个现象的原因是，熟透的蛋已经变成一个实心的整体，生蛋却因为它内部液态的蛋黄、蛋白，不能够立刻旋转起来，它的惯性作用就阻碍了蛋壳的旋转；蛋白和蛋黄在这里是起着“刹车”的作用。

生蛋和熟蛋在旋转停止的时候情形也不一样。一个旋转着的熟蛋，只要你用手一捏，就会立刻停止下来，但是生蛋虽然在你手碰到的时候停止了，如果你立刻把手放开，它还要继续略略转动。这仍然是方才说的那个惯性作用在作怪，蛋壳虽然给阻止



图36　怎样把蛋挂起来判别它们的生熟



了，内部的蛋黄、蛋白却仍旧在继续旋转；至于熟蛋，它里面的蛋黄、蛋白是跟外面的蛋壳同时停止的。

这类实验，还可以用另外一种方法来进行。把生蛋和熟蛋各用橡皮圈沿它的“子午线”箍紧，各挂在一条同样的线上(图36)。把这两条线各扭转相同的次数以后，一同放开，你立刻就会看到生蛋跟熟蛋的分别：熟蛋在转回到它的原来位置以后，就因为惯性作用向反方向扭转过去，然后又退转回来，——这样扭转几次，每次的转数逐渐减少。但是生蛋却只来回扭转三四次，熟蛋没有停止它就早停下来了：这是因为生蛋的蛋白、蛋黄妨碍了它的旋转运动的缘故。

“魔　盘”

把一柄伞撑开，伞头着地，然后把它的柄转动起来，很容易使它很快地继续旋转。现在，试把一个小球或纸团丢到伞里去：那东西并不停留在伞上，却给抛了出来。这个把小球或纸团抛出来的力量，一般人常常不正确地叫它“离心力”，实际上这只是惯性的作用。小球或纸团并不是依半径的方向移动，而是向跟圆运动的路线相切的方向抛出去。

有些公园有一种“魔盘”的设备(图37)正是根据这个道理制造的。参加“魔盘”游戏的人，就有机会亲自感受惯性的作用。参加的人，随自己高兴，在那个大圆盘上站着也好，坐着也好，卧着也好。圆盘底下的一部电动机就会缓缓地依着圆盘的竖轴把它旋转起来。起初转得比较慢，后来越转越快。于是，因了惯性的作用，圆盘上的人便开始向它的边上滑去。这个滑动，起初还不大容易觉察，但是当这些“乘客”离开圆心越来越远，滑到了越来越大的圆周上，这个惯性的作用也就会越来越显著。最后，无论你

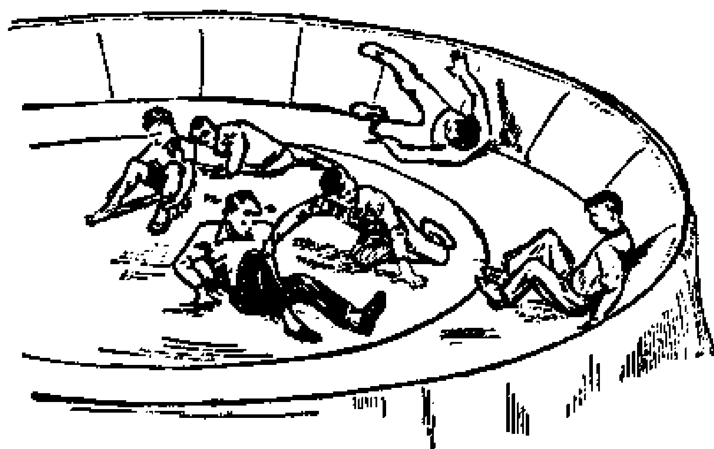


图 37 “魔盘”
旋转圆盘上的人由于惯性作用，被抛向盘外

花多少力气想继续停留在原地也不可能了，终于你被这个“魔盘”抛了出去。

我们的地球事实上也是同样性质的一个“魔盘”，只不过尺寸大得多罢了。地球虽然没有把我们抛出去，但是至少它减轻了我们的体重。因此，譬如说，在赤道上的人(赤道是地球上转速最大的地方)的体重由于这个原因所减轻的，竟达到原来体重的 1/300。假如把影响体重的别的因素也计算在内，赤道上人体体重一共要减少 0.5% (就是 1/200)，因此，一个成年人在赤道上的体重，要比在两极上的时候减少大约 300 克。

墨水滴画成的旋风

拿一块光滑的白色硬纸板剪成圆形，中间插一根削尖了的火柴梗，就可以做成一个陀螺，像图 38 右所画的是它的实际大小。要使这个陀螺旋转，并不需要特别的技巧，只要把火柴梗的上部夹在大拇指和食指之间，把它拧转以后，很快丢到平滑

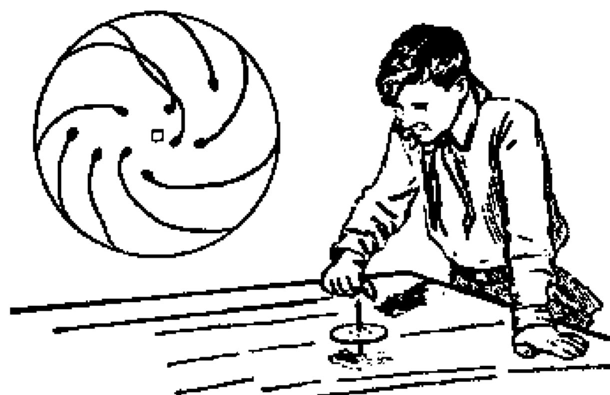


图 38　墨水滴在旋转的圆纸片上流散的情形

的面上，就可以了。

现在，你可以利用这个陀螺做一个很有意义的实验。在使它旋转之前，在那圆纸片上先滴几小滴墨水。接着，不等墨水干燥，立刻把陀螺拧转。等它停下来以后，再看看那些墨水滴：每一滴墨水已经画成一条螺旋线，而这些墨水滴画出的螺旋线合起来看，就像旋风的模样。

像旋风的模样倒并不是偶然的。你知道这圆纸片上的螺旋线表示了些什么吗?这其实是墨水滴移动的轨迹。每一滴墨水在旋转的时候受到的作用，跟坐在“魔盘”上的人受到的完全一样。这些墨水滴在离心作用下离开了中心向边上移动，在边上纸片的转速比墨水滴本身的要大了许多。

在这些地方，这圆纸片仿佛从墨水滴底下悄悄地溜了过去，跑到了它们的前面。结果每一滴墨水仿佛都落到了圆纸片的后面，退到它的半径后面似的。它的路线正因了这个缘故才显出弯曲的形状——使我们在纸片上看到了曲线运动的轨迹。

从高气压地方向外流动的空气流(就是所谓“反气旋”)或流向低气压的空气流(就是所谓“气旋”)所受到的作用也完全相同。因此，墨水滴画成的螺旋线实在可以说是真正旋风的缩影。

受骗的植物

物体很快旋转的时候，所产生的离心作用可以达到极大的数值，这个数值竟能够超过重力的作用。下面就是一个有趣的实验，可以使你认识一只普通车轮旋转时候所产生的“甩开力”究竟有多大。我们都知道，一株新生植物的茎总是向重力作用的相反方向生出的，换句话说，总是向上生长的。但是，假如让种子在很快旋转的车轮上生长发芽的话，那么你就可以看见非常奇怪的现象：根会生向轮外，而茎却顺着半径方向朝轮子的中心生出(图 39)。

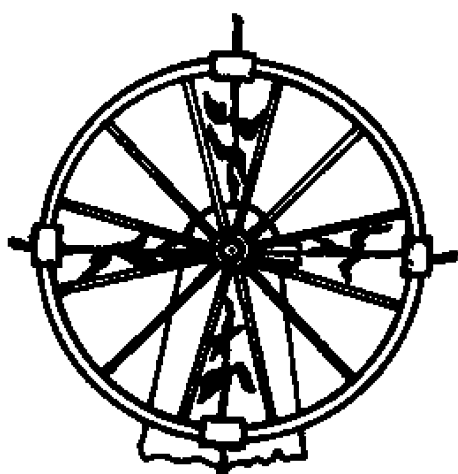


图 39　种在旋转车轮上的豆种，它的生长情形
豆茎向轮心生出，根却生向外面

我们好像把植物欺骗了：把影响它的重力作用，用另外一个从轮心向外作用的力来代替了。因为茎总是向重力相反方向生长的，因此，在这个情形下，它就沿着从轮缘到轮轴的方向向轮心生长。我们的人造重力比自然重力更大，[1]因此，这株幼苗就在它的作用下生长了。

---

〔1〕从引力的性质来看，这两种力是没有多大分别的。



“永 动 机”

关于“永动机”和“永恒运动”，无论是它们的直接的意义或者引申的意义，大家已经谈得很久了，但是，并不见得每一个人能够真正认识这些话所含的意义。永动机是想象中的一种机械，它能够不停地自动运动，而且，还能够做某种有用的功(例如举起重物等)。这样的机械虽然早就有许多人不断地想制造，却到现在还没有人能够制造成功。许多人的尝试都失败了，这使人们肯定地相信永动机是不可能制造的，并且从这一点确立了能量守恒定律——这是现代科学上的基本定律。至于所谓“永恒运动”，说的是一种不做什么功的不停运动的现象。

图40画的就是一种设想的自动机械——这是永动机的最古设计的一种，这个设计到现在还有永动机的幻想者在复制出来。在一只轮子的边缘上，装着活动的短杆，短杆的一端装着一个重物。无论轮子的位置怎样，轮子右面的各个重物一定比左面的重物离轮心远，因此，这一边(右边)的重物总要向下压，就使轮子转动。这样，这只轮子就应该永远转动下去，至少要转到轮轴磨坏才停止。发明家原来是这样想的。但是，真正制造出来以后，它却并不会转动。发明家的设计在事实上行不通，这又是为什么呢?

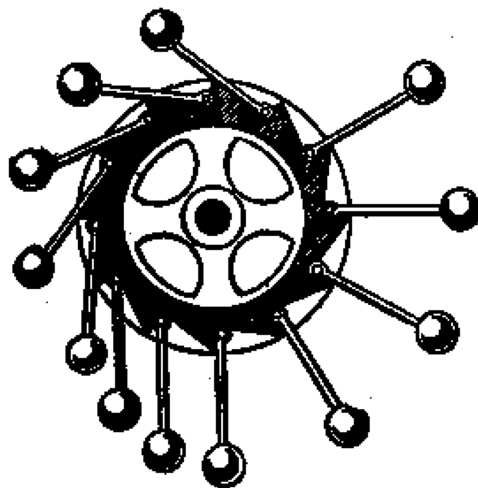


图40　中世纪时代设想的永动轮

原因是这样的：虽然轮子右面的各个重物离轮心总比较远，

但是这些重物的个数总比左边的少。请看图 40：右边一共只有 4 个重物，但左边却有 8 个之多。结果轮子就保持平衡状态，于是轮子自然也就不会转动，只在摇摆几下之后，停到像图上所画的位置上。[1]

现在已经肯定地证明，能够永远自动运动(特别是在运动的时候还要做出功来)的机械,是不可能制造出来的,因此,如果有谁正在向这方面努力,那会是一种毫无希望的劳动。在从前,特别是中世纪，人们为了研究和解决这个“永动机”(拉丁名字叫 perpetuum mobile)的构造问题,白白花了不知道多少时间和劳力。在那个时候,发明永动机甚至比用贱金属炼黄金更叫人入迷。

普希金的作品《骑士时代的几个场面》里,就曾经描写过一位名叫别尔托尔德的这类幻想家：

> “什么叫做 perpetuum mobile？”马尔丁问。
>
> “perpetuum mobile，”别尔托尔德回答他说，“就是永恒的运动。只要我能够想法得到永恒的运动,那么我就将设法望到人类创造的边缘……你可知道，我亲爱的马尔丁!炼制黄金自然是一件动人的工作,这方面的发现可能也是有趣而且有利的，但是，如果得到了 perpetuum mobile……啊……”

人们曾经想出几百种“永动机”,但是这些永动机没有一架曾经转动过。每一个发明家,就像我们所举的例子里那样,在设计的时候总有某一方面给忽略了,这就破坏了整个设计。

这儿是另外一种想象的永动机:一只圆轮,里面装着可以自由滚动的沉重的钢球(图 41)。这位发明家的想法是,轮子一边的钢球,总比另外一边的离轮心远,因此,在它们的重力作用之下,一定

[1] 这儿要应用到所谓“力矩定律”。



要使轮子旋转不息。

他的想法当然是不会实现的，原因跟图 40 所画的那个轮子一样。虽然这样，但是在广告狂的美国，却有一家咖啡店为了吸引顾客，特地设置了一只很大的这样的轮子(图 42)，当然，这只轮子看来虽然像真的是由于沉重钢球的滚动在旋转，但它实际上只是由一架隐蔽着的电动机来带动的。

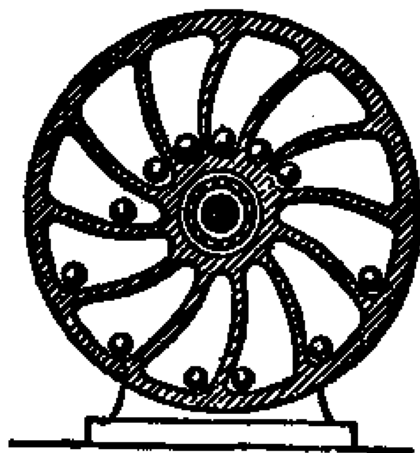


图 41　装有自由滚动的钢球的永动机

这一类幻想的永动机的模型还有许多，有一个时期曾经被装在钟表店的橱窗里，用来吸引顾客注意：这些模型都是暗地里受到电力的作用才旋转的。



图 42　美国洛杉矶市的假想的永动机(广告用)

有一架广告用的“永动机”给我添了许多麻烦。我的工人学生们，看到了这个东西之后，对于我苦口婆心说明的永动机不可能制造的一切证明都怀疑起来。那架“永动机”上的球儿，滚来滚去的，果然在转动着那只轮子，而且还被这只轮子举高起来，这比各种证明更有说服力；他们不肯相信这架“永动机”只是受到发电厂送来的电流作用才转动的。幸好那时候电厂在例假日都停止送电，这才使我有机会解决这个问题。我告诉学生在例假日再去看看，他们照样做了。

“怎么样，看到那‘永动机’了吗？”我问。

“没有，”那些学生红着脸回答说，“我们看不见它：它给报纸遮住了……”

能量守恒定律终于又得到了那些学生的信任，而且再也不会失去这个信任了。

“发 脾 气”

许多自学的发明家也曾经努力寻求解决“永动机”这个谜样的问题，花了不少的心血。有一位西伯利亚人，名叫谢格洛夫的，后来被谢得林用“小市民普列森托夫”的名字描写在《现代牧歌》那篇小说里。谢得林把他访问这位发明家的情形写成这样：

> 小市民普列森托夫年纪大约35岁，身材瘦削，面色苍白，有一对深思的大眼睛，长发直披到后颈。他的草舍相当大，但是足足有半间给一个巨大的飞轮占据了，使得我们这些人只能够局促地挤在那里。这个大轮子不是实心的，中间有许多轮辐。轮缘用薄木板



钉成，内部是空心的，跟一只箱子一样，这中空的轮缘有相当大的容积。在这中空部分，装置着全部机械，就是发明家的全部秘密。当然，这个秘密并不特别精明，它只像一些装满沙土的袋，用来维持平衡。有一根木棒沿着一条轮辐穿过，使轮子静止不动。

“我们听说您把永恒运动的定律应用到实际上了是不是?”我开始说。

“不知道怎么说好，”他涨红着脸回答，“好像是的……”

“可以参观一下吗?”

“欢迎得很!真荣幸……”

他把我们引到那轮子旁边，然后带我们绕轮子四周走了一圈。我们发现，这个轮子前后都是一样的。

“会转吗?”

“好像，应该是会转的。就是要发脾气……”

“可以把那根木棒拿下来吗?”

普列森托夫拿下了那根木棒，可是轮子并没有动起来。

“还在发脾气!”他重复说，“要推它一下才成。”

他用两只手抱住轮缘，几次把它上下摇动，最后，尽力摇了一下，放开了手，轮子转起来了。最初几圈转得果然相当快而且很匀，只听到轮缘里面的沙袋落到横档上或者从横档上抛开去的声音；以后这轮子就转得慢下来了；木轴上也吱咯吱咯地响起来，最后，轮子完全停了下来。

“一定又在发脾气了!”发明家涨红着脸解释道，于是又跑去摇动那只大轮子。

但是这一次还是跟方才那一次的情形一样。

“会不会是忘记把摩擦作用计算在内了?”

“摩擦作用计算在内的……摩擦算什么?这不是摩



擦的问题，而是……有时候这轮子仿佛高兴起来，可是后来又忽然……发脾气，倔强起来——这就又完了。假如这只轮子是用真正的材料做的那就好了，可是，你看，只是些东拼西凑来的板。"

当然，这儿问题并不在“发脾气”，也并不在没有使用“真正的材料”，而是在于这架机械的基本思想是不正确的。轮子虽然旋转了几圈，但是这只是因为发明家推动才转的，等到外加的能量给摩擦消耗完了，就不可避免地要停止下来。

蓄能器

对于永恒运动，如果只从外表上观察，很容易产生极大的错误认识。这一点，可以用所谓“蓄能器”来做一个最好的说明。1920年，有一位发明家创造了新型风力发电站，装着一种便宜的“惯性”蓄能器，这种惯性蓄能器有跟飞轮相像的构造。这是一块大圆盘，能够在滚珠轴承上绕着竖轴旋转，圆盘装在一只壳子里面，壳子里抽去了空气。只要你想法使它每分钟转到20 000圈的高速度，这个圆盘就会在连续15昼夜里不停地转着！如果粗心的观察者只看到圆盘的竖轴没有外加能量也会不停地旋转，那么他真会认为永恒运动已经实现了。

“见怪不怪”

许多人迷恋在“永动机”的创造里面，得到了非常悲惨的



结局。我知道有一位工人，为了试制一架“永动机”的模型，用完了他的收入和全部积蓄，最后变成了一贫如洗。他成了那不可实现的幻想的牺牲者。但是他虽然衣衫褴楼，整天饿着肚子，却仍旧向人家要求帮助他去制造已经是“一定会动”的“最后模型”。说起来是很沉痛的，这个人所以失掉了一切，完全是因为对于物理学基本知识知道得还不够。

有趣的是，找寻“永动机”固然是永远没有结果的，反过来，对于这个不可能的事情的深入了解，却时常会引出许多很好的发现。

16世纪末、17世纪初，荷兰著名学者斯台文发现了斜面上力量平衡的定律，他发现这个定律的方法，正可以作上面一段话的最好说明。这位数学家应该享受比他享受到的更大的名声，因为他有许多重大的贡献是我们现在还继续利用的：他发明了小数，在代数学里最早应用了指数，发现了流体静力学定律，这定律后来又被帕斯卡重新发现。

他发现这个斜面上力的平衡定律，并没有用到力的平行四边形法则，就只是靠这儿复制出来的那幅图(图43)。在一个三棱体上架着一串球，球一共14个，都是一样大小的。这一串球会怎么样呢?那下面挂下来的部分，不成问题，是会自己平衡的，但是还有上面的两部分，会不会平衡呢?换句话说，右边的2个球跟左边的4个球会不会平衡?当然会的，如果说不会，那么这串球就会自动不停地从右向左移动，因为一个球滑下以后就有另一个球来补充，平衡也就永远不可能得到了。但是，我们既然知道这样架着的一串球完全不会自己移动，那么，右边的2个球就自然跟左边的4个球平

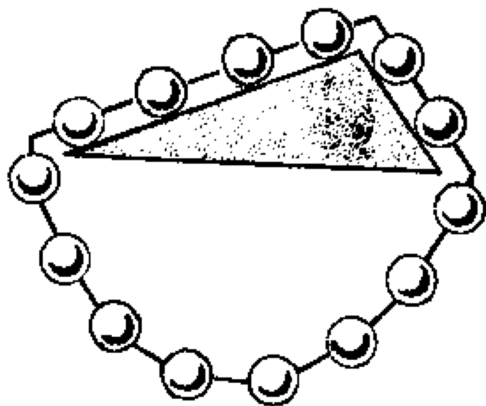


图43 “见怪不怪”

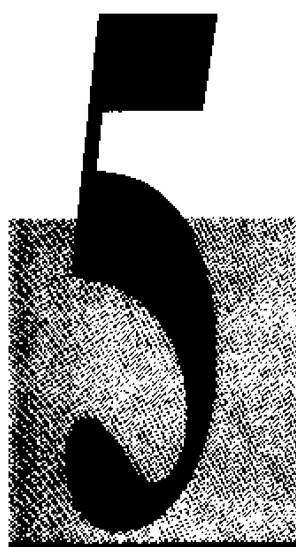
衡。你看，初看这好像是一件怪事：2 个球的拉力竟跟 4 个球的相等。

从这个看似奇怪的现象，斯台文发现了力学上一个重要的定律。他是这样来思考的：这一串球的两段——一段长一段短——重力不相等：长的一段跟短的一段重力的比值，恰好是斜面长的一边跟短的一边长度的比值。从这里得出一个结论，就是用绳连在一起的两个重物搁在两个斜面上，只要两个重物的重力跟这两个斜面的长度成正比，它们就可以保持平衡。

有时候两个斜面里短的一个恰好是竖直的，于是我们就得到力学上的一个有名定律：要维持斜面上的一个物体不动，一定要在竖直面的方向上加一个力，这个力跟物体重力的比等于这个斜面的高度跟它的长度的比。

这样，从“永动机”不可能存在这一个思想出发，竟完成了力学上的一件重要发现。





液体和气体的性质

两把咖啡壶的题目

在你面前(图 44)是两把同样粗的咖啡壶：一把比较高，一把比较低。哪一把能够盛得更多些呢?



图 44 哪一把壶里能够盛更多的液体

许多人一定不假思索地说，高的那把要比低的盛得更多些。但是，假如你把液体倒到高壶里去，只能够把液体盛到壶嘴的水平面，再多就要溢出来了。现在两把壶的壶嘴是一样高的，因此低壶能够盛的液体量跟高壶盛的完全相同。

这道理非常简单：咖啡壶和壶嘴就像一具连通器，虽说壶里的液体要比壶嘴里的液体多得多，但是里面的液面还是应该在相同的水平面上。假如壶嘴太低的话，那么你就不可能把壶注满，因为液体会从壶嘴溢出去。一般说来，各种水壶的壶嘴都要做得比壶顶略高，使它即使在略略倾斜的时候水也不会溢出。

古人不知道的事情

现代的罗马居民到今天还在使用着古人所修造的水道：古代罗马的奴隶把水道修造得真是坚固。

关于领导这个工程的罗马工程师的知识却不能这样说：很



明显，他们对于物理学的基本知识还了解得很不够。请看从古书复制出来的图45。你看，罗马的水道不是装在地下，而是装在地上，高高架设在石柱上的。他们为什么要这样做呢？难道像现

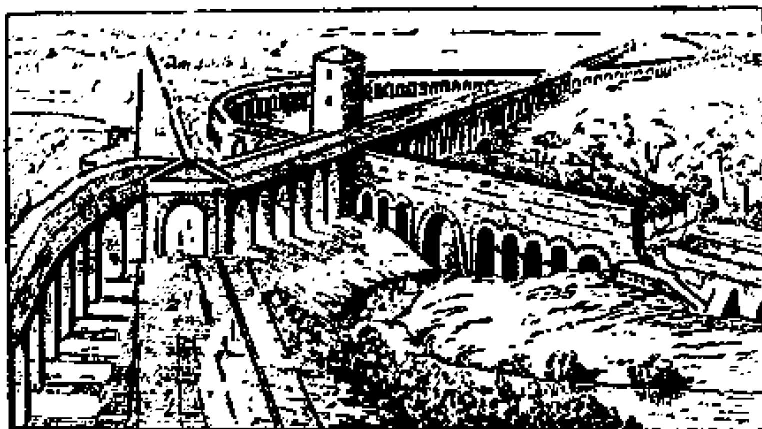


图45　古代罗马水道建设的原来情形

在这样用管子埋到地下去不更省事吗？当然更省事，但是那时候的罗马工程师对于连通器的原理只有极模糊的认识。他们恐怕，用长管子连接起来的各个水池里，水面会不在同一水平面上。假如把管子沿着高低不平的地面埋下去，那么在有的地段上，管里的水就得向上流——而古代的罗马人却怕水不会向上流。因此，他们一般常把全段水管装成平匀往下倾斜的（为了做到这一点，时常要使管子绕个大弯，或者要用高高的拱形支柱）。古代罗马的一条水道叫阿克瓦·马尔齐亚的，全长100公里，但是水道两端之间的直线距离，却只有这个数目的一半。只是因为不懂物理学的基本定律，竟多造了50公里长的石头工程！

液体会向……上压

关于液体会向下加压力，压向容器的底部，会向侧面加压力，压向容器的壁，那即使没有学过物理学的人，也都知道得非

常清楚。但是，液体还会向上加压力，这一点却有许多人没有想到。其实只要用一只普通煤油灯的灯罩，就可以帮助我们认识这种压力确实存在。用厚纸板剪一个圆片，要比灯罩口略大一些。把它盖在灯罩口上，倒转来放到水里去，像图 46 所示。为了使那圆纸片不会从灯罩上脱落，可以用条细线穿在圆纸片中心，通过灯罩引到上面来，用手拉着线，或者，也可以直接用手指在底下托着纸片。等到这个灯罩渐渐沉到水底下一定的深度，这个圆纸片就会自己留在灯罩口上，不必再用线拉住它或者用手指托住它：现在托着它的已经是容器里的水了，是水从下向上向圆纸片在加着压力了。

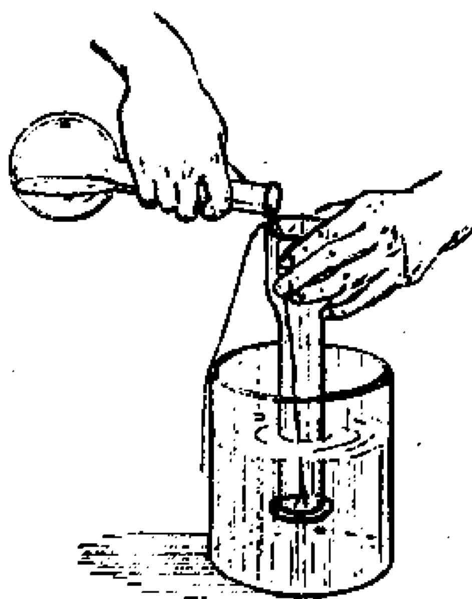


图 46　一个简单的实验，用来证明液体从下向上加压力

你甚至可以测出这个向上压力的大小。这很简单，只要小心地慢慢把水注到灯罩里去，等到灯罩里的水面接近灯罩外容器里的水面，这个圆纸片就会跌落下去。这就是说，纸片底下的液体向上所加的压力，恰好给纸片上面那个水柱的下压力平衡了，这个水柱的高度等于纸片沉在水面以下的深度。这就是液体对于一切浸在液体里面的物体所作用的压力的定律，有名的阿基米德原理告诉我们的，物体在液体里重力的“损失”也是从这里产生的。

如果找到几种罩口大小相同但是形状不同的灯罩，你就可以再做一次实验，来证明另外一个有关液体的定律，就是液体对于容器底部所加的压力，只跟底部面积和水面高度有关，却跟容器的形状无关。可以这样来证明：按方才所说的实验方法用形状不同的灯罩来一次一次地做，每次把灯罩浸到一样深度



(事先可以在灯罩的同样高度上用纸粘一条标志)。那么，你就可以看到，每次当灯罩里的水面达到了同样高度，那纸片就会跌落下去(图 47)。这就是说，各种形状容器里的水柱，只要它们的底面积和高度相同，它们的压力也相同。请注意，这儿重要的只是高度而不是长度，因为比较长的、倾斜的水柱和比较短的、竖直的水柱，如果水面高度相等，它们对于容器底的压力(在相等的底面积上)也完全相等。

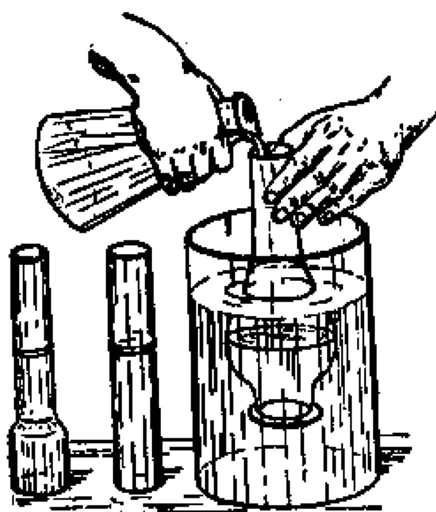


图 47　液体对于容器底部所加的压力，只跟底部面积和水柱高度有关

图中表示证明这个定律的方法

哪一边比较重

天平的一只盘上放着盛满清水的水桶，另一只盘上放一只一模一样的水桶，也同样盛满清水，只是水上浮着一块木块(图 48)。天平的哪一边要向下落呢?

我曾经把这个问题问过许多人，得到不同的答案。有些人说有木块的那一边一定向下落，因为“桶里除水之外还多了一块木块”。另外一些人却提出相反的意见，他们认为应该是没有木块的那一边落下去，“因为水比木块更重”。

但是，这两种答案没有一种正确：两边应该是一样重的。在第二只桶里，固然水要比第一桶里少一些，因为那块浮着的木块要排挤掉一些水。但是，根据浮体定律，一切浮起的物体，会用它浸在水里的部分排出跟这物体同重力的水。因此，

两边的重力是应该相等的。

现在请你解答另外一个问题。我把半杯水放在天平的一只盘上，旁边还放一个小砝码。在另一只盘上加砝码使两边平衡。现在，我把杯子旁边那个砝码投进那杯水里。这架天平要起什么变化吗？

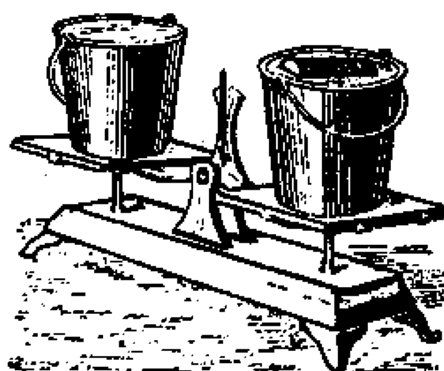


图 48　两只一模一样的桶，同样盛满了清水，一只桶里的水上浮着一块木块，哪一边比较重呢

根据阿基米德原理，这个砝码在水里是要比在水外轻些的，这样说来，那只放着杯子的天平盘就应该向上升起了，但实际上呢，整个天平仍旧是保持平衡的，这又怎样解释呢？

原来，砝码丢进杯里以后，排出了一部分水，被排出的水升高到原来的水面以上；因此增加了压向杯底的压力，这样杯底就受到了跟砝码所失重力相等的附加压力。

液体的天然形状

我们平常都认为液体没有一定的固有的形状。这种想法其实是不正确的。所有液体的天然形状都是球形。可是一般因为有重力作用妨碍它保持这个形状，因此，如果它不是盛在容器里，就会变成薄层流散开去，如果盛在容器里就会变成跟容器一样的形状。一些液体如果停留在另一种密度相同的液体里，那么，按照阿基米德原理，它要“失去”它的重力：仿佛重力对它不起一点作用——那时候，这液体才显出了固有的天然的球形。

橄榄油在水里会浮起，但是在酒精里却要沉落。因此可以用水和酒精混合成一种稀酒精液，使这油在这稀酒精液里既不沉落，



也不浮起。用一只注射器把少许橄榄油注进这稀酒精液里，我们会看到一个奇怪的现象，这一些油竟凝成一个很大的球形的油滴，既不沉落，也不浮起，静静地悬在那里(图49)。[1]

做这个实验的时候，一定要有耐心而且要仔细地动作，——否则的话，得到的会不是一滴大的，而是分散成比较小的几滴。当然，得到一些小油滴也还是很有趣味的。

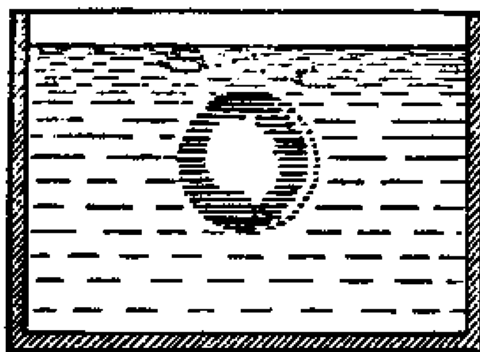


图49　在稀酒精液里的油滴：既不沉落，也不浮起(普拉图实验)

可是，我们的实验还要继续做下去。把一根细长的木条或金属丝通过这个油滴的中心，把它旋转起来。这个油滴也会跟着旋转起来（假如在做这个实验的时候，能够把一片渍油的硬纸小圆片装在旋转轴上，使它能够整个放在圆球里面的话，那么结果就会更加圆满)。圆球受到旋转的影响，开始变扁，几秒钟以后，会甩出一个圆环来。这个圆环分裂成许多小滴，每一小滴都变成球形，继续绕中央油滴旋转(图50)。

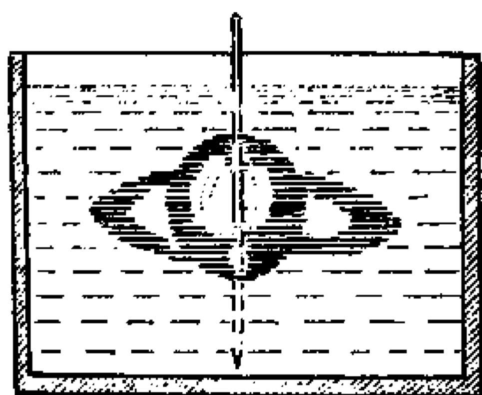


图50　假如用一根细长木条插进油滴中心，使油滴旋转，就会有一个油环分裂出来

这个有意思的实验，最早是比利时的一位物理学家普拉图做出的。我们现在说的就是普拉图的实验方法。但是，这个实验可以做得更加方便且同样有意思。这方法是这样的：用清水把一只小玻璃杯冲洗干净，装上橄榄油，放到另外一只大玻璃杯的底上；然后仔细把酒精

〔1〕为了使油滴的球形不会歪曲，实验应该在有平壁的容器里进行。

注到大玻璃杯里，使小杯整个浸在酒精里。然后，用一只汤匙小心地沿着大杯的杯壁添进一些水去。于是，小杯里的橄榄油面就逐渐向上凸起来；等到注进去的水已经相当多的时候，小杯里的橄榄油就完全从杯里升了起来，变成一个相当大的圆球，悬在酒精和水的混合液里(图 51)。



图 51　普拉图实验的简化

手头没有酒精的时候，这个实验可以用苯胺代橄榄油来做。苯胺是一种液体，在常温下比水重，但是在 75 ～ 85 摄氏度的时候却比水轻。因此，只要把水加热，就可以使苯胺悬在水里，这时候苯胺也成球形。如果要在常温里做这个实验，可以用食盐水代替清水，苯胺会悬在适当浓度的食盐水里。[1]

为什么铅弹是圆形的

方才我们说过，一切液体，只要不受到重力作用，就会显出它的天然形状——球形。我们回忆到前面说过的自由落体的受力情况，并且假定在落下的最初瞬间，我们能够把空气的阻力忽略不计的话，[2] 那么我们就会想象到，这个落下的液体一定也会是球形的。事实上，落下的雨滴的确是球形的。铅弹实际上就是冷凝了的熔融铅滴，它的制法也就是利用这一个道

〔1〕也可以用对甲苯——一种暗红色的液体；对甲苯在 24 摄氏度时的密度跟盐水的密度相仿，可以把对甲苯加到盐水里去。

〔2〕雨滴落下的情形，只在落下的最初瞬间跟自由落下的物体相像，在落下开始以后第一秒的后半秒，它的落下已经变成匀速运动了，雨滴的重力和空气阻力相平衡，空气阻力随雨滴速度的增加而增大。

理，熔化的铅滴从高塔上落下来落到冷水里，凝固成球形。

这样做成的铅弹，叫做“高塔法”铅弹，因为是从一座高塔的顶上落下来制造的(图 52)。所谓高塔是一个 45 米高的金属建筑，顶上装着熔铅炉，在下面是一个大水槽。制成的铅弹要再经过拣选加工。熔解的铅液实际上还在落下的路上就已经凝固了，水槽不过是用来减轻落下时候的撞击，以免损坏它的球形(直径超过 6 毫米的铅弹却是用另外一种方法制成的——把金属丝切成小段，然后一段一段地碾压成球形)。

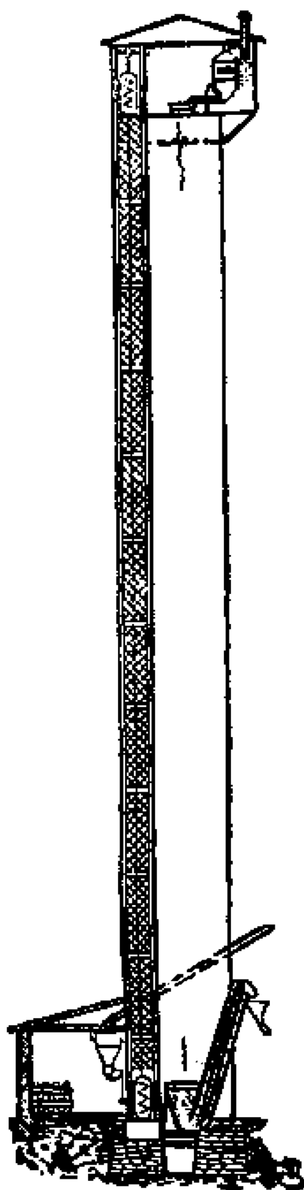


图 52　制铅弹的高塔

“没底”的酒杯

你已经把水注满到杯子的边上，杯子里完全装满了水。在杯子旁边有一些大头针。或许，杯子里还可能找得出一点点地方来安放一二枚大头针吧？试试看。

请你把大头针一枚一枚投进杯子里去，数着你投进去的数目。投大头针的时候要谨慎小心：要小心地把针尖放进水里，然后轻轻把手放开，不让有一点震动，也不加一点压力。你默默地数着：1 枚、2 枚、3 枚，已经有 3 枚落到杯子底上了——可是水面并没有变动。10 枚、20 枚、30 枚了，杯里的水并没有溢出。50 枚、60 枚、70 枚……已经是整整 100 枚大头针丢在杯底了，可是杯里的水仍旧没有溢出一点来(图 53)。

而且，还不只是没有水溢出来，甚至看不到水面有显著高出杯口的情形。再加多些大头针看看。200 枚、300 枚、400 枚大头针已经沉到杯底了，可是，仍旧没有一滴水从杯口溢出来；只是现在已经可以看到水面比杯口略略高起一些了。原来，这个奇怪现象的解答正在水面高起这一点。玻璃只要略沾些油污，便很难沾水；在我们杯口的边上，也跟一切常用的器具一样，难免由于人手的接触留下一些油脂的痕迹。杯口的边上既然不会沾水，那么，被杯里的大头针所排出的水就只好形成一个高起的凸面。这个凸面的高出程度很不显著，这只要花一点时间算出一枚大头针的体积来，拿它跟这个高起部分的体积比较一下，就知道大头针的体积只有高起部分的体积的几百分之一，因此在这个装满水的杯子里才能找出容纳几百枚大头针的地方。用的杯子杯口越大，可以容纳的大头针也越多，因为杯口越大，高起部分的体积也越大。


图 53　奇怪的加针实验

要更清楚地了解这个问题，让我们做一个计算，一枚大头针大约 25 毫米长、0.5 毫米粗。这样一个圆柱体的体积不难依照几何学上的公式$\left(\frac{\pi d^2h}{4}\right)$算出，等于 5 立方毫米。再加上大头针的头，总体积大约不超过 5.5 立方毫米。

现在来算一算杯口上高起部分的体积，假定杯口直径是 9 厘米(90 毫米)。这样的圆面积大约等于 6 400 平方毫米。如果我们把高起的水层的厚度算作 1 毫米，那么它的体积就是 6 400 立方毫米，这就有大头针体积的 1 200 倍。换句话说：一只装“满”水的杯子，竟可以容纳 1 000 多枚大头针！而事实上，只要仔细地把针一枚一枚投进去，你的确能够把整千枚大头针投进杯里去，甚至这些大头针看起来已经满杯都是或者已经突出到杯口以外了，水却仍旧一点没有溢出来。



煤油的奇异特性

凡是用过煤油灯的人，大概都会有过这样一种经验：你把煤油灯装满煤油，然后把它的外壁擦得干干净净，但是过了一小时，你发现它的外壁又有煤油。

这个现象说明煤油的一种特性。原来你没有把煤油灯加油口的盖子旋紧，因此，很想沿着玻璃表面流开去的煤油，就爬到了容器的外壁上。如果你想避免煤油的这一种麻烦，那么就得把盖子尽可能旋紧。[1]

煤油这个“爬行”的特性，使得用煤油(或石油)做燃料的轮船感到非常头痛。在这种轮船上，假如不采取适当的措施，会完全不可能运载货物，除非是运煤油或石油；因为这种液体透过看不见的间隙“爬”出来以后，不但流遍了油箱的外面，并且会到处渗开去，甚至渗到乘客的衣服上。而对这种恶作剧的斗争的许多尝试，却常常是没有效果的。

英国幽默作家詹罗姆在一篇开玩笑的中篇小说《三人同舟》里讲到煤油的一段描写，并没有过分夸大，他写道：

> 我不知道还有什么东西会比煤油更会向各方渗开的。我们是把它装在船头上的，它却从那儿偷偷地窜到船艄，一路上把所有的东西都染上它的气息。它渗透了船身接合的缝子，落进了水里，发散到空中，毒害了生命。有时候刮起了北面来的煤油风——这真是一种新奇

[1] 旋紧盖子之前，不要忘记看看容器里的煤油会不会装得太满了：因为煤油在受热的时候膨胀得很厉害(温度增加 100 摄氏度时，体积要增加原体积的 1/10)，为了避免容器胀破，一定要预先留出一些给煤油膨胀的空隙。

的风；有时候是南面吹来的，有时候是东面或西面吹来的，但是不管它从哪一面吹到我们这儿来，总是充满着煤油的气息。在黄昏的时候，这个气息减低了落日的奇观，而月光呢，也沉浸在煤油的气息里……我们把船系留在桥边，上岸到城里去走走——但是一阵可厌的气味始终追随着我们。仿佛整个城市都给这种气息渗透到了。[1]

煤油这种会布满容器外壁的特性，常常使一些人认为煤油会透过金属和玻璃，这种想法自然是不正确的。

不沉的铜圆

铜圆在水里不沉，不但童话里有这种事情，就在实际中也有。你只要做几个简单的实验，就会相信这句话了。让我们从最细小的物件——缝衣针——开始。要使一枚针浮在水面，看起来是不可能的事，但是实际上这件事情做起来并不怎么困难。把一张薄纸放到水面上，上面放一枚完全干燥的针。另外用一枚针或大头针把薄纸慢慢压到水里去，从纸边开始一步一步压到纸的中心；等到全张纸都湿透了，它就会自己沉没下去，而针却仍旧留在水面上(图 55)。假如你有一块磁石，那么你甚至可以把磁石放在杯子外面、水面的旁边来控制针在水



图 54　浮在水面上的针针的切面(针粗 2 毫米)和水面凹下的实际形状(放大到实际大小的 2 倍)

[1] 当然，实际上只是这几位旅客的衣服给渗透了煤油罢了。



面上的浮动。



图 55　利用薄纸使针浮在水面的方法

经过相当的练习以后，你竟可以不用薄纸就把针放在水面上：只要用两只手指抓着针的中部，在离水面不远的地方水平地放下就可以了。

你还可以用一枚大头针(2 毫米粗)、钮扣或者小巧的平面形的金属物件来代替缝衣针。等你这一些都已经会做而且熟练了之后，可以拿一枚铜圆去试试看。

这些金属物品所以能够浮在水面上，原因是这些东西在我们手里蒙上了一层极薄的油，使得它们不容易沾水。正是因为这个缘故，漂浮着针的水面四周，形成了一个凹下去的表面，这种表面凹下去的情形，我们甚至能够直接看得出。液体(水)的表面薄膜一直在想恢复原有的平面，因此对针发生从下向上的压力，支持了针不会沉下去。此外，针所以没有沉下去，还受到液体排斥力的作用，因为，根据浮体定律：针所受到的从下向上的排斥力(浮力)，等于它所排开的水的重力。

使缝衣针漂浮的最简单的方法，是事先把它涂上一层油；这种针可以直接放到水面上去而不会沉下。

筛子盛水

连用筛子盛水这样的事情也不只是在童话中才有。物理学的知识帮助了我们做到这件一般认为不可能的事情。拿一个金属丝编成的直径 15 厘米大小的筛子，筛孔不必太小(直径大约在 1 毫米左右)，把筛网浸到熔化的石蜡里。然后把筛子拿起，

金属丝上就覆上一薄层人的眼睛几乎看不见的石蜡。

现在，筛子仍旧是筛子——那儿有可以透过大头针的孔——但是现在你已经能够用它来盛水了。在这种筛子里，可以盛相当高的水层而不会让水透过筛孔漏下来，只要你盛水的时候小心些，并且不要让筛子受到震动就可以了。

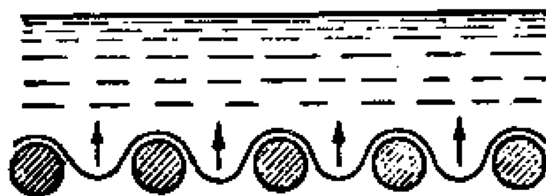


图 56　为什么水不会从筛孔里漏下去

为什么水不会漏下去呢？因为水是不会把石蜡沾湿的。因此，在各筛孔里造成了向下凹的薄膜，正是这个薄膜支持了水不漏下去(图 56)。

假如把这浸过石蜡的筛子放到水上去，那么它就会留在水面上。可见这筛子不但可以用来盛水，而且还能够在水面上浮起。

这个看来好像奇怪的实验，解释了我们平日看惯了的却没有好好想过的许多最普通的现象。木桶和小艇上涂松脂，塞子和套管上抹油，以及所有我们想要做成不透水的物体上都涂上油漆之类，还有在织物上涂敷橡胶——这一切，目的无非跟方才筛子浸石蜡一样，总的目的是一样的，不过筛子的情形更显得特别罢了。

泡沫替技术服务

钢针和铜圆浮在水面的那个实验，跟矿冶工业上用来选出矿石里的有用矿物的方法很相像。选矿的方法有许多种，我们这儿讲的“浮沫选矿法”是最有效的一种。在别种方法不能够完成任务的时候，这个方法仍旧可以应用得相当成功。

浮沫选矿法的实际情形是这样的：把轧得很碎的矿石装到



一只槽里，槽里盛水和油。这油有一种特性，能够在有用矿物的粒子外面包起一层薄膜，使粒子不沾水。通空气把这混合物强烈搅动，就产生许多极小的气泡——泡沫。包有薄油膜的有用矿物的粒子一跟空气泡的膜接触，就会连在气泡上，随着气泡升起，跟大气里的气球把吊篮升起一样(图 57)。至于没有油膜的别种粒子，却不会附到气泡上，而仍旧留在液体里。应该注意，空气泡的总体积要比那些有用矿物的粒子的总体积多许多，因此气泡是能够把这些固态的矿屑带到上面去的。结果，有用的矿物粒子几乎全部附着到泡沫上，跟着浮到液体的表面来。把这层泡沫刮下来去继续处理，它所含的有用矿物就比原始矿石所含的丰富几十倍。

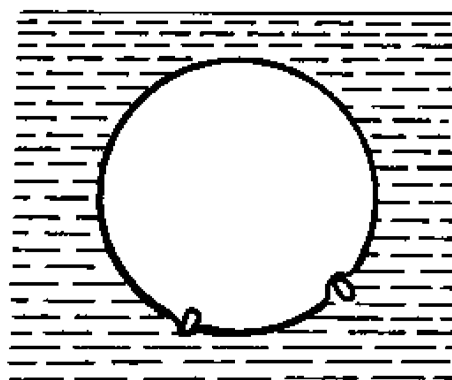


图 57　浮沫选矿法的原理

在今天，浮沫选矿法在技术上已经进步到很高的水平，只要选择适当的液体，可以从随便什么成分的矿石里把每一种有用的矿物都提出来。

浮沫选矿法虽然在工业上已经有了广泛的应用，但是对这个方法的物理作用方面，却还没有透彻明白。在这件事情上，实践走在理论的前面。浮沫选矿法不是从理论上产生的，而是从一件事实的仔细观察上产生的。在 19 世纪末期，有人在洗濯装过黄铜矿的染满油污的麻袋的时候，发现黄铜矿的细屑跟着肥皂泡浮了起来。这件事情推动了浮沫选矿法的发展。

肥皂泡

你会吹肥皂泡吗?这件事情并不像想象的那么简单。我本来也认为吹个肥皂泡不需要什么技巧，但是，事实却告诉我，要想吹出又大又漂亮的肥皂泡，也的确是一种艺术，是需要好好练习的。那么，像吹肥皂泡这样简单平常的事，也值得去干吗?

是的，这玩意儿在日常生活里是并不受到特别欢迎的，至少在谈话里我们对它不太感兴趣；但是，物理学家对它却有不同的看法。"试着吹出一个小小的肥皂泡来，"物理学家说，"仔细去看它：你简直可以终身研究它，不断地从这儿学到许多物理学上的知识。"

事实上，肥皂泡薄膜面上诱人的色彩，使物理学家可以量出光波的波长，而研究娇嫩的薄膜的张力，又帮助了关于分子力作用定律的研究，这种分子力就是内聚力，如果没有内聚力，世界上就会除了最微细的微尘之外什么也没有了。

当然，我写出下面这几个实验的目的，并不是要来探讨这些重大的问题。我这里写的只是一些引人入胜的消遣，只是用来使你对吹肥皂泡的艺术有一个认识。在波依斯著的《肥皂泡》那本书里，有很多关于各种肥皂泡实验的详尽说明。我这里只谈几个最简单的实验。

肥皂泡可以用普通洗衣服的黄肥皂的溶液[1]吹出，但是对于这件事情真有兴趣的人，我介绍他采用橄榄油或杏仁油肥皂，因为这两种肥皂最适宜吹制又大又漂亮的肥皂泡。把一小块这种肥皂小心放在清洁的冷水里溶化，最好用洁净的雨水或

〔1〕洗脸用的香肥皂不大合用。

雪水，如果没有的话，至少也得用冷却了的开水。如果想使吹出的泡能够耐久，还得在肥皂液里加上1/3(依容积计)的甘油。现在，用一只小茶匙把溶液上层的泡沫去掉，然后把细瓷管或细笔管的一端里外两面擦过肥皂，放到溶液里去。用10厘米左右长的细麦秆也可以得到很好的成绩。

肥皂泡可以这样吹：把管口竖直地放到溶液里，使得管口上蘸上一层溶液膜，拿起来小心地吹。由于肥皂泡里装进了从我们肺部出来的暖气，这气体比房里的空气一般要轻些，因此吹出的泡就会向上升起。

假如一下子就能够吹出直径10厘米大小的泡来，那么所配成的溶液就可以用了；否则就要在溶液里加些肥皂，一直到能够吹出这样大小的泡为止。但这还不够。把肥皂泡吹出以后，用手指蘸些肥皂液，试着插进肥皂泡里去，假如肥皂泡不破裂，那就可以做下面的实验了；如果肥皂泡破裂了，那么还得加些肥皂到溶液里去。

各个实验一定要仔细耐心地去做。房里的光线一定要尽可能充足，否则，从吹出的泡上看不到美丽的彩虹。

下面是几个吹肥皂泡的有趣的实验。

花朵四周的肥皂泡：拿一些肥皂液倒在一只大盘里或者茶具托盘里，倒到大约2～3毫米厚的一层；在盘子中心放一朵花或者一只小花瓶，用一只玻璃漏斗把它盖起。然后缓缓把漏斗揭开，用一根细管向里面吹去——于是就吹出一个肥皂泡来；等到这个肥皂泡达到相当大以后，把漏斗倾斜(像图58右所示的样子)，让肥皂泡从漏斗底下露出来。于是，那朵花或者那只小花瓶就给罩在一个由肥皂薄膜做成的、闪耀着各种彩虹的透明半圆罩子底下了。

如果手头有一个小型的石膏人像，也可以用来代替方才的花或者花瓶(图59右)。这应该先在石膏人像头上滴一点肥皂液，等到大肥皂泡吹成以后，把管子透过大肥皂泡膜伸进去，

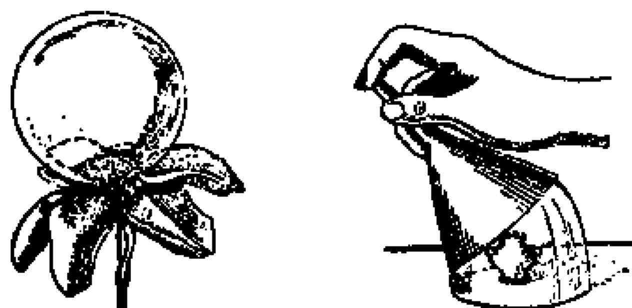


图 58　肥皂泡的几种实验
花朵上的肥皂泡，花瓶四周的肥皂泡

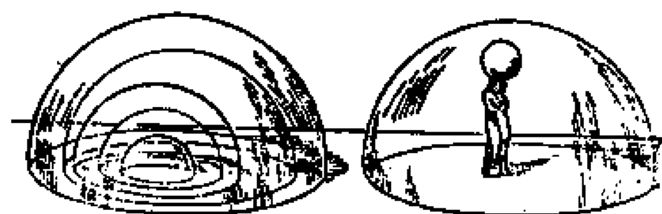


图 59　一个套一个的肥皂泡，罩在大肥皂泡里顶在石膏像上的小肥皂泡

把人像头上的小肥皂泡也吹起来。

一个套一个的肥皂泡(图 59 左)：用方才那个漏斗先吹出一个大肥皂泡来，然后把细长的管子整个浸到肥皂液里，使它除了含在嘴里的一部分之外，全段都蘸上了肥皂液，然后小心地把这根管子插进大肥皂泡的膜里，一直伸到中心，再慢慢地抽回来，到离大肥皂泡的膜不远的地方，吹出第二个泡来，然后在这个泡里吹出第三个、第四个，等等。

肥皂膜造成的圆柱体(图 60)：先准备两个铁丝圆环。把吹好的肥皂泡放在下面一个环上，把沾有肥皂液的另一个环从上面轻轻放到肥皂泡上，然后，把这个环慢慢向上提，把泡拉长，一直到它成圆柱形为止。有趣的是，假如你把上面的圆环提高到比圆环圆周长更大的高度，圆柱的一半就收缩起来，另一半却放宽起来，终于变成了两个泡。

肥皂泡的薄膜总是在张力的作用之下，而且对于它里面的空气有压力；把吹有肥皂泡的漏斗口放近蜡烛火焰的话，可以看到



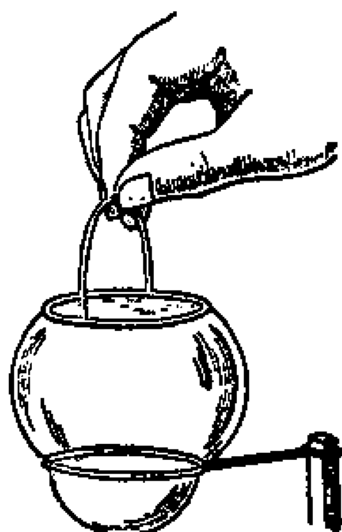


图 60　怎样做圆柱形的肥皂泡

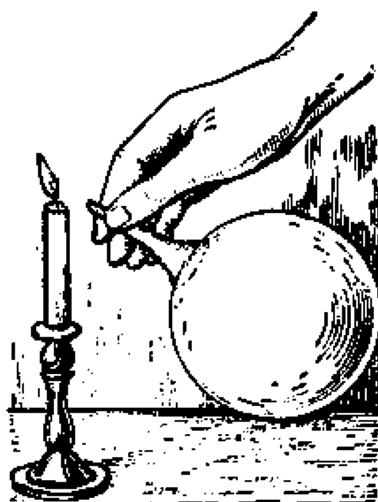


图 61　空气被肥皂泡的薄膜排出

这样薄的薄膜的力量并不算小，火焰会显著地向一边倾斜开去(图 61)。

肥皂泡还有一个有趣的现象：你把它从温暖的房间带到比较冷的地方，它就会缩小体积。相反，如果从冷的地方带到热的地方，体积就会胀大。原因当然是泡里空气的热胀冷缩。假如在零下 15 摄氏度的时候，这个泡的体积是 1 000 立方厘米，那么，当它走进到温度是 15 摄氏度的房间里，体积应该增加 110 立方厘米：

$$1000\times30\times\frac{1}{273}\approx110\text{ 立方厘米}$$

我们还应该指出，一般人认为肥皂泡的“寿命”太短，这一点，是并不完全正确的：如果给它适当的照顾，可以使肥皂泡保存到几十天。英国物理学家杜瓦(他因对液化空气的研究而著名)把肥皂泡保存在特制的瓶子里，排除尘埃，防止干燥和空气的震荡，可以把肥皂泡保存一个月或者还不止。有人把肥皂泡保存在玻璃罩下面，一直保存了好几年。

什么东西最细最薄

许多人大概还不知道肥皂泡的薄膜是人的眼睛能够辨别的最细最薄的东西的一种。我们一般形容东西很细很薄的，常常说“跟头发一样细”、“跟一张纸一样薄”，但是这些用来做比喻的东西如果跟肥皂泡的薄膜相比，那就相差太远了。肥皂泡的薄膜只抵得上头发或者薄纸的1/5000厚！一根头发，放大到200倍，

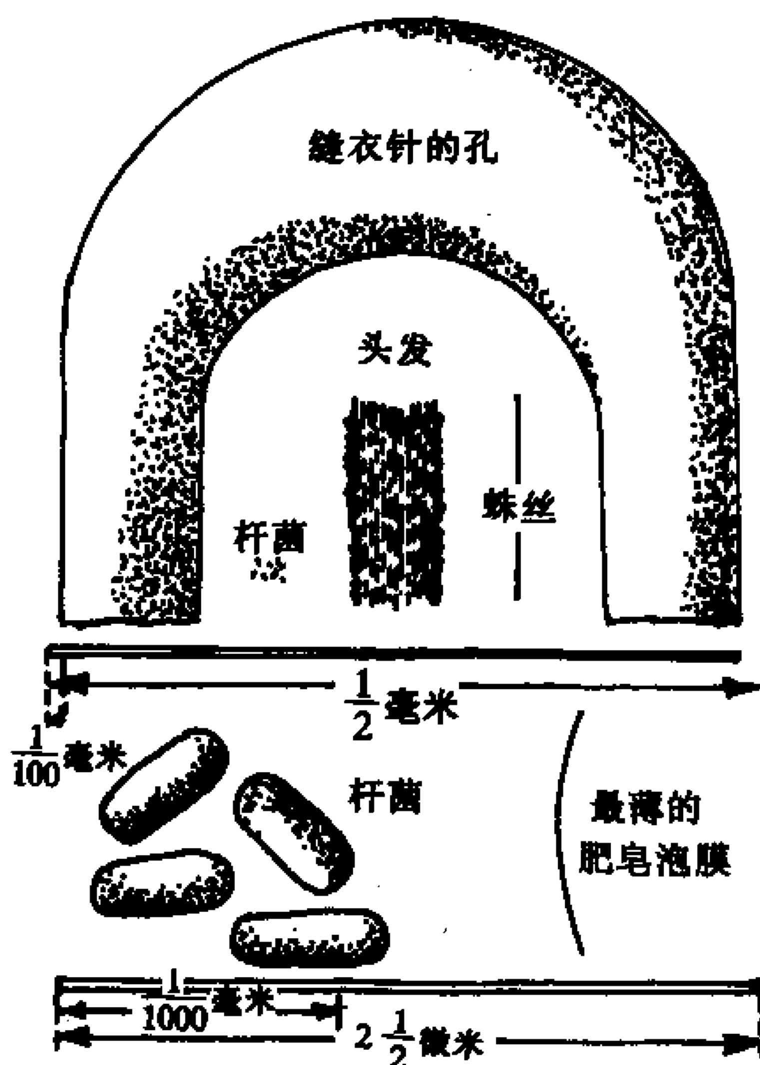


图62　上：放大到200倍的缝衣针的孔、头发、杆菌和蛛丝；
下：放大到40 000倍的杆菌和最薄的肥皂泡膜



大约等于 1 厘米粗细，但是肥皂泡薄膜的截面即使也放大到 200 倍，仍旧薄得我们简直没法看清楚。得把这薄膜截面再放大到 200 倍，才能看得出有一条细线那样粗；而一根头发如果也再放大到 200 倍(一共放大到 40 000 倍)就会有 2 米粗细了。图 62 就是表明这一些关系的。

要从水里拿东西而不把手沾湿

把一枚铜圆放在平底的大盘里，倒上清水，把铜圆淹没，然后，请你用手把铜圆拿出，却不许把手沾湿。

这个好像根本不可能的题目，只要一只玻璃杯和一张燃着的纸就可以解决。把纸燃着，放到杯子里，很快把杯子倒转，盖在铜圆附近的盘上。纸烧完了，杯子里满是白烟，过了一会，盘里的水竟自动流到杯里去了。这时候那个铜圆当然还留在盘上，只要稍许等一会，等它干了，就可以把它拿出来，这时候你的手就可以一点不沾水。

是什么力量把水赶到杯里去，使它支持在某一个高度却不落下来呢?这是空气的压力。燃着的纸烧热了杯里的空气，空气的压力增加了，就把一部分空气排了出去。等纸片烧完以后，杯里的空气又冷了下来，压力也跟着减低了，外面空气的压力就把盘里的水赶进杯子里去了。

不用纸片，拿两根火柴插在一个软木塞上，点着了，像图 63 所示的样子，也可以得到同样结果。

我们时常听到甚至读到一些对于这个实验的不正确的解释。[1]说什么纸片燃着后，“烧去了杯里的氧气”，因此杯里的气

[1] 这一点，最先讲到并且提出正确解释的，是公元前 1 世纪时的古代物理学家拜占廷的菲罗。

体减少了。这种解释是完全不正确的。主要的原因是由于空气的受热，而完全不是什么纸片烧去了一部分氧气。这一点的证明就是：第一，这个实验可以完全不用燃烧纸片，只要把杯子在沸水里烫过也可以。其次，假如用浸透酒精的棉花球来代替纸片，那么，因为它可以燃烧得更久，把空气烧得更热，水也就几乎可以升到杯子的一半；但是，大家都知道，空气里的氧只占全体积的1/5呀。最后，还有一点可以提出，就是“烧去”了氧却产生了二氧化碳和水汽，它们会占据氧的位置的。

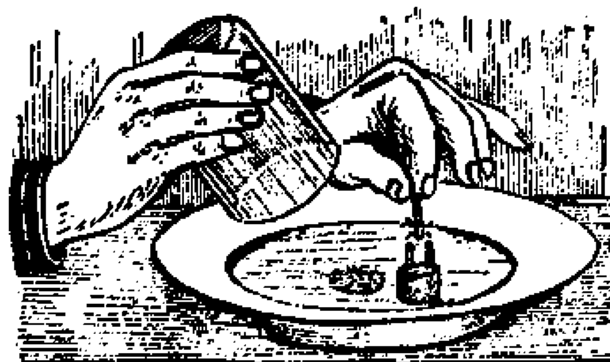


图63　怎样使盘里的水全部流到倒立的杯里去

我们怎样喝水

咦！难道连这样一个题目还有什么值得去想一下的吗？当然，我们已经习惯把杯子或茶匙放到嘴唇边，把里面装着的液体“吸”进去。就正是这个我们已经非常习惯了的简单的“吸”的动作需要解释一下。真的，为什么液体会流进我们的口腔去呢？是什么东西使它流进去的？原因是这样的：在喝水的时候，我们一定要把胸腔扩大，这样就把口腔里的空气抽去，使口腔里的压力减低；于是，在外面的空气压力作用之下，液体就要流到压力比较小的地方——流进到口腔里去了。这里发生的现象，跟连通管里的液体所发生的完全一样，假如我们把*在连通管的一个管里液面上的空气抽稀薄*，这时候，由于大气



压力的作用，连通管这一个管里的液面就会升高。相反，如果你用嘴唇严密地裹着一只盛水的瓶的瓶口的话，那么即使你用很大的力，也不可能从瓶里吸出水来，这是因为嘴里空气的压力和瓶里水面上的压力完全相等的缘故。

所以，严格地说，我们喝水不只是用嘴巴，还用肺部，就因为肺部的扩张才使水流进到我们嘴里去。

漏斗的改善

假如你曾经用过漏斗把某种液体注到玻璃瓶里去，你一定有这样的经验，就是一定要常常把漏斗向上提起一下，否则液体就会留在漏斗里，不流下去了。这是因为瓶里的空气没有排出去的路，因此它的压力阻碍了漏斗里的液体流进去。起初固然也会有一些液体流下去，这是因为瓶里空气受到压力的作用，略略缩小一些的缘故。但是，空气的体积一压缩，压力也就增高了，就会抵住了漏斗里的水的压力。因此，假如不把漏斗提起，让压缩的空气逸出，漏斗里的水是不可能继续流进瓶里去的。

因此，最实际的办法是把漏斗的外面做成瓦楞形，使漏斗架在瓶口上以后，仍旧留出许多间隙，让瓶里的空气往外流。这种构造的漏斗在平常还没有见到应用；在实验室里却已经在用这种构造的漏斗了。

一吨木头和一吨铁

大家都知道这个用来开玩笑的问题：一吨木头和一吨铁，哪一个重些?有人不想一想就回答说一吨铁重些，常常引起大家的哄笑。

假如回答的人说一吨木头重些，那么大家就要笑得更厉害了。这样的说法，好像一点没有根据，可是严格地说，这个答案却是正确的!

问题在于阿基米德原理不但在液体方面适用，在气体中也适用。根据这个原理，每个物体在空气里所“失”的重力，等于被这物体所排开的同体积的空气重力。

木头和铁，在空气里当然也要失去它们的一部分重力，要求出它们的真正重力，得把所失的重力加上去。因此，在我们这个题目里，木头的真正重力应该等于一吨加上跟这块木头同体积的空气重力；而铁的真正重力应该等于一吨加上跟这块铁同体积的空气重力。

但是，一吨木头所占的体积，要比一吨铁多得多(大约等于铁的 15 倍)，因此，一吨木头的真正重力要比一吨铁的真正重力大!说得更明确些，我们应该说成这个样子：在空气里重一吨的木头的真正重力，要比在空气里重一吨的铁重些。

一吨铁大约占据 1/8 立方米的体积，而一吨木头大约占据 2 立方米的体积，这两种物体排出的空气相差大约 2.5 千克。你看，一吨木头实际上要比一吨铁重这么多!



失重的人

大概许多人小时候就有过一种幻想：假如自己变成和羽毛一样轻，甚至比空气还轻，[1] 那就可以免除那个讨厌的引力的作用，自由自在地高高升到天空去，飘游到各地，那该多么好呀！但是，这样想的时候忘记了一件事情，就是人所以能够在地面上行动，只是因为人比空气重。实际上，托里拆利说过，“我们人是生活在空气海洋的底上的”，因此，假如我们不管什么原因突然变轻了，变得比空气还轻，就不可避免地要向这个空气“海洋”的表面升起。那时候我们的遭遇就会跟普希金所写的“骠骑兵”那样：“我把整瓶都喝光了：信不信由你，我可突然像羽毛般地向上飘起了。”那时候我们会升到几公里高，一直升到那稀薄空气的密度跟我们身体的密度相等的地方为止。而你原来打算自由自在地在山谷、平原上盘旋游历的想法，也完全破灭了，因为，你从引力的约束下解放出来了，却立刻又成了另外一个力的俘虏，成了大气流的俘虏了。

作家威尔斯曾经把这种不寻常的处境选做他的一部科学幻想小说的主题。

一位非常臃肿肥胖的人，多方想法减轻他的体重。这篇小说的主角恰好有一种神奇的药方，吃下这种药会使胖子减轻体重。这个胖子向他要了药方，照着把药服了下去，于是，当那位主角去探望这个朋友的时候，下面这出乎意外的事件使他大吃一惊。他敲了敲房门：

---

〔1〕有人认为羽毛比空气轻，但是这是不正确的认识；这东西实际上要比空气重好几百倍。它所以能够在空中飘浮，只是因为它有极大的面积，使空气对它的浮力跟它的重力比较起来显得很大。


图 64 “我在这儿哪，老兄!”派克拉夫特说

门许久还没有开。我听到钥匙的转动声音，然后，听到了派克拉夫特(胖子的名字)的声音：

“请进来。”

我旋动了门柄，打开了房门。自然，我以为一定可以看到派克拉夫特了。

可是，你猜怎么样——他不在房里!整个书房都零乱得很，碟子和汤盆放在书本和文具中间，几张椅子都翻在地上，可是派克拉夫特却不在这儿……

“我在这儿哪，老兄!请把门关上。”他说。这时候我才发现他。

这个人竟在天花板底下、靠门的那个角落，好像给人粘在天花板上似的。他的脸上带着恼怒和惊恐的表情。

“如果有些什么差池，那么，您，派克拉夫特先生，就会跌下来把头颈跌坏的。”我说。

“我倒情愿跌下来呢。”他说。

“像您这样年纪和体重的人，竟做这种运动……可是，真的，您是怎样支持在那儿的呀?”我问。

突然我发现竟是一点也没有什么支持他，他是飘浮在那上面，就像一个吹胀了的气球。

他用力打算离开天花板，想沿墙壁爬到我这儿来。他抓住一只画框，但是那画框跟着他过去了，他就又飞到了天花板底下。他撞到天花板上，这才使我



明白，他的膝肘各部之所以沾上了许多白粉的缘故。他重新用更大的细心和努力，想利用壁炉落下来。

“这个药方儿，”他喘息着说，“简直太灵验了。我的体重几乎完全消失了。”

这一下，我一切都明白了。

“派克拉夫特！”我说，“您其实只需要治好您的肥胖病，但是您却一直把这叫做体重……好，别忙，让我来帮助你吧。”我说，一面捉住这位不幸的朋友的一只手，把他拖了下来。

他想站稳在什么地方，就在房间里乱蹦乱跳。真是一件不可思议的怪事！这就跟在大风里想拉住船帆的情形一样。

“这张桌子，”不幸的派克拉夫特说，他已经跳得非常疲惫了，“很结实，很笨重，请把我塞到那底下去……”

我这样做了。可是，虽然他已经给塞到桌子底下，还仍旧在那儿摇晃着，跟一只系着的气球一样，一分钟也不肯安静。

“有一件事情要提醒您，”我说，“您千万别想跑到屋子外面去。如果您跑到屋外去了，那您就会飞升到高空去……”

我提醒他要对他现在这个新的处境想好办法。我暗示他可以学会在天花板上用两只手走路，这大概不会有什么困难的。

“我没法睡觉。”他抱怨说。

我教给他在铁床的钢丝网上缚好一个软褥子，把一切垫在床上的东西用带子绑在那上面，把被也扣在铁床的边上。

人们给他搬了一架木梯进来，把食物放到书橱顶上。我们还想出了一个绝顶聪明的办法，使派克拉夫

特能够随时落到地板上，这办法很简单，原来《大英百科全书》是放在敞开着的书橱的最上一层的，胖子只要随手拿两卷书在手里，他便会落到地板上来了。

我在他的家里整整待了两天，两天里，我用小钻和小锤想尽办法给他做了一些奇怪的用具，给他装了一条铁丝，使他能够去按铃唤人，等等。

我坐在壁炉旁边，他呢，挂在他自己喜欢的那个角落上，正在把一张土耳其地毯钉到天花板上去，这时候我起了一个念头：

"哎，派克拉夫特！"我喊道，"这些事情，我们都多做了！在你衣服里面装一层铅衬里，不就一切都解决了吗！"

派克拉夫特高兴得差一些要哭出来。

"去买一张铅板，"我说，"衬在衣服里面。靴子里也要衬上一层铅，手里再提一只实心铅块做成的大手提箱，那就行了！那时候您就不必再待在这儿，简直可以到国外去旅行了。您更用不着担心轮船出事，万一出了事只要把身上的衣服脱去一部分或者全部，您就可以在空中飞行。"

上面所说的初看仿佛跟物理学上的定律完全符合。但是，这篇故事里也有一些问题应该提出来。最重要的一点是，即使体重全部消失了，胖子也并不可能升到天花板底下去！

事实是这样的：根据阿基米德原理，派克拉夫特只有在他衣服连同口袋里的物体的总重力比他那肥胖身体所排开的空气的重力小，才能"浮起"到天花板底下去。要算出一个人的体积所排开空气的重力也不难，只要我们知道人体的密度大约跟水相等。我们平均体重大约是 60 千克，可知同体积的水重也是这么多，而空气的密度一般只有水的 1/770，这就等于说，跟人



体同体积的空气大约重 80 克。我们的派克拉夫特先生，再胖也恐怕不会超过 100 千克，因此，他所排开的空气最多也不会超过 130 克。那么，难道这位先生的衣、裤、鞋、袜、日记册、怀表以及别的小东西的总重力会不超过 130 克吗?当然不止。那么，这位胖子就应当继续停留在房里的地板上，虽然相当不稳定，但是至少不会“像系着的气球那样”，浮到天花板上去。他只有在完全脱掉衣服之后，才真正会浮上去。如果穿着衣服，他只应当像绑在“跳球”[1] 上的人一样，只要稍稍用一些劲，比方说轻轻地一跳，就会跳到离地面很高的地方，如果没有风，就又慢慢地落下来。

“永动”的时钟

我们在这本书里已经谈到好几种想象的“永动机”，而且也解释过发明永动机是没有希望的。现在我再来谈一谈一种“不花钱”的动力机，所谓“不花钱”的动力机，就是不要什么人照顾，却能够长时期工作的机械，这种机械所需要的动能是从四周的自然环境里得到的。

大家大概见过气压计这个东西吧。气压计有两种：水银气压计和金属气压计。在水银气压计里，水银柱的上端随时跟着大气压力的变化升起或降下；在金属气压计里，在大气压力变化的时候，指针会跟着摆动。

18 世纪的时候，一位发明家利用了气压计的这种运动来发动时钟，他就这样造出一只时钟，能够不要外力就使钟自动地走起来，而且可以不停地走。英国的有名机械师和天文学家弗格

[1] 关于“跳球”的详细情形，请参看我著的《趣味力学》第四章。

森看到这个有趣的发明以后，曾经这样评价(在 1744 年)道：“我仔细观察了上面说的那只时钟，它是由一个特别装置的气压计里的水银柱升降带动的；我们没有理由可以相信这只钟会在什么时候停下来，因为储藏在这只时钟里的动力即使把气压计完全拿走，也已经可以维持这只钟走一年之久。我应该率直地说，根据我对于这只时钟的详细的考察，无论在设计上或者制造上，它的确是我见到过的机械里最精巧的一种。”

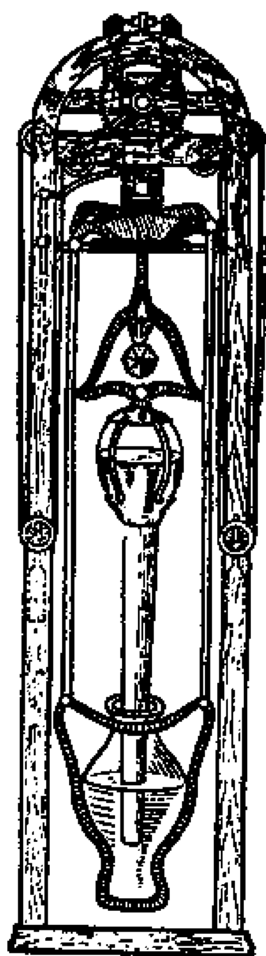


图65 18世纪“不花钱”的时钟的构造

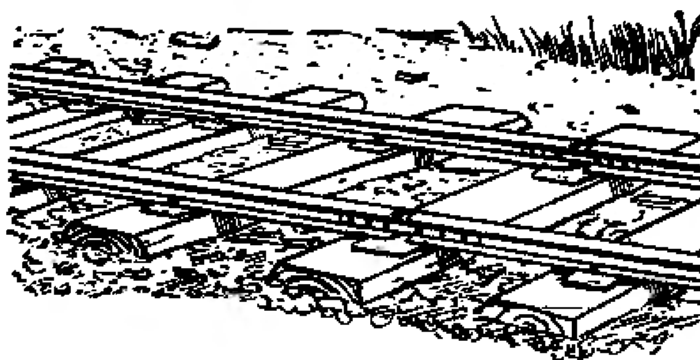
可惜这只时钟没有能够保留到今天，它给人抢走了，现在藏在什么地方也没有人知道。不过现在还留下来那位天文学家所作的构造图(图 65)，因此还有可能把它重新制出来。

在这只时钟的构造里，有一只大型水银气压计。盛水银的玻璃壶挂在一只框架上，一只长颈瓶倒插在这玻璃壶里，在玻璃壶和长颈瓶里一共装了 150 千克水银。玻璃壶和长颈瓶是活动的，可以移上或移下。当大气压力增加的时候，一组巧妙的杠杆会把长颈瓶移下，玻璃壶移上；气压减低的时候，相反地把长颈瓶移上，玻璃壶移下。这两种运动会使一只小巧的齿轮总是向一个方向转。只有大气压力完全不变的时候，这个齿轮才完全静止不动——但是在静止的时候，时钟仍旧会由事先提升上去的重锤落下的能量继续带动。要使重锤能够提升上去而又要靠它的落下来带动机械，是不容易做到的，但是古时候的钟表匠却很有发明能力，把这个问题解决了。气压变动的能量太大，超过了需要，使得重锤提升上去比落下来更快；因此得有一个特别的装置，等到重锤提升到不能



再高的时候，会让它自由地落下去。

这种或者类似的“不花钱”的动力机，跟所谓“永动机”有重大的、原则的区别，这个区别不难看出。在“不花钱”的动力机里，动力不是像永动机的发明家所想的那样“无中生有”，它们的动能是从机械外面得到的，在我们这个例子里就是从四周的大气得到的，而大气是从太阳光得到这些能量的。“不花钱”的动力机实际上是跟真正“永动机”一样经济的，只是这种机器的制造成本跟它所得到的能量来比嫌太贵了些。



6 热的现象

十月铁路在什么时候比较长

对于下面这个问题："十月铁路有多长?"——有人这样回答："这条铁路的平均长度是640公里，夏天比冬天要长出300米。"

这个出人意外的答案，并不像你所想的那么不合理：假如我们把钢轨密接的长度叫做铁路的长度的话，那么这条铁路的长度就真的应该夏天比冬天长。我们不要忘记，钢轨受热会膨胀——温度每增高1摄氏度，钢轨就会平均伸长原来长度的万分之一。在炎热的夏天，钢轨的温度会达到30～40摄氏度或许更高些：有时候太阳把钢轨晒得摸起来烫手，但是在冬天，

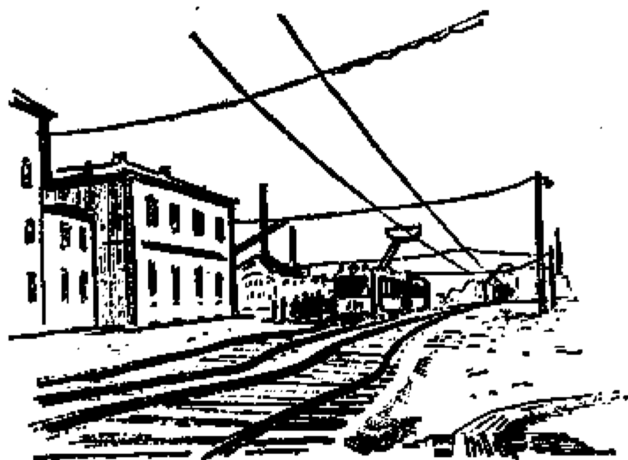


图66　天气极热的时候，电车轨道也给胀弯了

钢轨会冷到零下25摄氏度或者更低。我们就把55摄氏度当做冬夏两季钢轨温度的差数，把铁路全长640公里乘上0.000 01再乘55，就知道这条铁路要伸长1/3公里!这样看来，莫斯科和列宁格勒之间的铁路在夏天要比冬天长出1/3公里，也就是说，大约长出300米了。

当然，事实上这儿伸长了的并不是这两个城市之间的距



离，而只是各根钢轨的总长度。这两个东西并不相等，因为铁路上的钢轨并不是密接的：在每两根钢轨相接的地方，留出了一定大小的间隙，[1] 以便钢轨受热的时候有膨胀的余地。数学的计算告诉我们，全部钢轨的总长度是在这些空隙之间增加的，在夏天很热的日子比冬天极冷的日子要伸长 300 米之多。因此事实上十月铁路的钢轨长度夏天比冬天长 300 米。

不受处罚的盗窃

莫斯科到列宁格勒之间的电讯线路，每到冬天总要有好几百米值钱的电报线、电话线遗失得无影无踪，但是没有人为了这件事情焦急不安，虽说大家都很清楚知道这是谁干的事情。当然，你也一定知道的：干这件事情的就是冬天严寒的天气。我们方才谈的关于钢轨的情形，对于电话线也完全适用，不同的只是，铜做的电线受热膨胀的程度比钢轨大，等于钢轨的 1.5 倍。要注意的是，电话线上是没有留出什么间隙的，因此我们可以毫无保留地相信，莫斯科到列宁格勒之间的电话线，冬天要比夏天大约短 500 米。严寒的天气就在每个冬季偷掉半公里长的电话线。但是并未给电讯工作造成什么损害，等到暖和季节到来以后，它又会把“偷掉”的电线给送回来了。

不过，这样在冷天收缩的情形，假如不是发生在导线上，

---

[1] 假定钢轨长度是 8 米，在 0 摄氏度时这个间隙应该是 6 毫米，因此，这样大小的间隙要到 65 摄氏度才会胀满。电车钢轨敷设的时候，因为受到技术条件的限制，不可能留出间隙。幸亏电车钢轨一般都是嵌在地里的，温度的变化没有这么大，而且电车钢轨的安装方法也阻止它向旁边弯曲。但是在非常热的时候，电车钢轨也会给胀弯的，就像图 66 上所示的样子，这张图是依据一张照片画出来的。这种胀弯现象，在铁路上也偶有发生，因为列车在斜坡上行进的时候，时常会把轮子下面的钢轨带着前进(有时候甚至连枕木都给带动了)，因此，这种地方的间隙时常无意间给取消了，使得前后两根钢轨密接起来。

而是发生在桥梁上的话，那么，所得到的后果就非常严重了。下面是1927年12月报纸上刊登的一条新闻：

> 法国遭到连续几天的严寒的袭击，巴黎市中心的塞纳河桥受到严重的破坏。桥的铁架受冷收缩，因此桥面上砌的砖突然碎裂了。桥上交通只得暂时断绝。

艾菲尔铁塔的高度

假如现在问你，艾菲尔铁塔有多高，你一定会在回答“300米”之前，反问一句：

“在什么季节——冷天还是热天？”

因为你知道这么高的铁塔，它的高度一定不可能在什么温度都相同。我们知道，300米长的铁杆，温度每增加1摄氏度，要伸长3毫米。这座艾菲尔铁塔在温度增加1摄氏度的时候，大约也会加高这么多。在巴黎，夏天有太阳的时候，这座铁塔会给晒热到40摄氏度，而在阴冷的雨天，它的温度会跌到10摄氏度，冬天呢，那要跌到0摄氏度甚至于零下10摄氏度(巴黎严寒的时日不多)。你看，这座铁塔一年四季所受到的温度的变化要在40摄氏度以上，这说明了艾菲尔铁塔的高度可以伸缩$3\times40=120$毫米，就是12厘米(比这本书上的一行还长)。

直接度量的结果，使我们知道艾菲尔铁塔对于温度的变化，甚至比空气更敏感：它要比空气热得更快也冷得更快，在阴天太阳突然出现的时候，它比空气更早地起了反应。艾菲尔铁塔的高度，是用一种几乎不受温度变化的影响、始终保持原有长度的镍钢丝来量度的。这种镍钢叫做“因钢”(这是从拉丁文 invar 译音的，原意是“不变的”)。



就是这样，艾菲尔铁塔的顶端在热天要比冷天高出一段来，高出的一段大约有这本书上的一行这么长，这高出的一段是用铁做成的，但是这铁却不值一文钱。

从茶杯谈到水表管

一位有经验的家庭主妇，当她把热茶倒到客人的茶杯里去的时候，为了避免杯子破裂，总不会忘记把茶匙放在杯子里，最好是银茶匙。是生活上的经验教会她这个正确的做法的。那么，这个做法的原理是什么呢?

首先，我们要明白，在倒开水的时候,杯子为什么会破裂。

这原因是玻璃的各部分没有能够同时膨胀，倒到杯子里去的开水，没有能够同时把茶杯烫热。它首先烫热了杯子的内壁，但是这时候，外壁却还没有来得及给烫热。内壁烫热以后，立刻就膨胀起来，但是外壁还暂时不变，因此受到了从内部来的强烈的挤压。这样外壁就给挤破了——玻璃破裂了。

你千万不要以为杯子厚就不会烫裂。厚的杯子在这方面来说，恰好是最不可靠的；厚的杯子要比薄的更容易烫裂。这原因很明显。薄的杯壁很快就会烫透，因此这种杯子内外层的温度很快会相等，也就会同时膨胀；但是厚壁的杯子呢，那一厚层的杯壁要烫透是比较慢的。

在选用薄的杯子或者别种薄的玻璃器皿的时候，有一点不要忘记：不但杯壁要薄，而且杯底也要薄。因为在倒开水的时候，烫得最热的恰好是杯子的底部；假如底太厚的话，那么，不论杯壁多么薄，杯子还是要破裂的。有厚厚的圆底脚的玻璃杯和瓷器，也是很容易烫裂的。

玻璃器皿越薄，把它加热就越可以放心。化学家就是使用

非常薄的玻璃器皿的，他们用这种器皿盛了液体，就直接在灯上烧到沸腾，一点也不怕它会破裂。

当然，最理想的器皿应该是在加热时候完全不膨胀的那一种。石英就是膨胀得非常少的一种材料，它的膨胀程度大约只等于玻璃的 1/15 到 1/20。用透明的石英制成的厚壁器皿，可以随意加热也不会破裂。[1] 你可以把烧到红热的石英器皿丢到冰水里，也不必担心它会破裂。这一半是因为石英的导热度也比玻璃大。

玻璃杯不只在受到很快加热之后才会破裂，就是在很快冷却的时候，也有同样的情形发生，原因是杯子各部分冷缩时候所受的压力并不平均。杯子的外层受冷收缩，强烈地压向内层，而内层却还没有来得及冷却和收缩。因此，举例来说，装有滚烫果酱的玻璃罐，决不可以立刻放到严寒的地方或直接浸到冷水里面去。

好，让我们再回到玻璃杯里的银茶匙上来，究竟银茶匙是怎样保证杯子不破裂的呢？

玻璃杯的内外壁，只有当开水一下子很快倒进去的时候，受热程度才会有很大差别；温水却不会使杯子各部分受热有很大差别，因此也不会产生强大的压力，杯子也就不会破裂。假如杯子里放着一柄茶匙，那么会发生些什么情形呢？那时候，当开水倒进杯底的时候，在还没有来得及烫热玻璃杯（热的不良导体）之前，会把一部分的热分给了良导体的金属茶匙，因此，开水的温度减低了，它从沸腾着的开水变成了热水，对玻璃杯就没有什么妨碍了。至于继续倒进去的开水，对于杯子已经不那么可怕，因为杯子已经来得及略为烫热了。

总而言之，杯子里的金属茶匙，特别是这柄茶匙如果非常

---

〔1〕石英器皿对于化学实验室还有一个好处，就是很难熔化：它只在 1 700 摄氏度才软化。



大，是会缓和杯子受热的不平均，因而防止杯子的破裂的。

但是，为什么说茶匙假如是银制的，就会更好一些呢?因为银是热的良导体；银茶匙要比不锈钢的茶匙散热得更快。你一定知道，放在开水杯里的银茶匙是多么烫手!单凭这一点，你就已经可以毫无错误地确定茶匙的原料了，钢制的茶匙是不会感到烫手的。

玻璃器壁膨胀不平衡的现象，不但威胁玻璃杯的完整，并且还威胁蒸汽锅炉的重要部分——用来测定锅里水位的水表计。水表管只是一段玻璃管，由于内壁受到蒸汽和锅里沸水的作用，要比外壁膨胀得多。此外，蒸汽和水的压力更加强了管壁上所受的压力，因此，这个管子(水表管)很容易破裂。为了防止它破裂，有时候用两层不同的玻璃管来做，里面一层的膨胀系数比外面一层小。

关于洗完澡穿不进靴子的故事

是什么缘故使冬天昼短夜长，夏天昼长夜短呢?冬天昼短，和一切别的可见或不可见的物体一样，是由于冷缩的缘故；至于夜长，是因为点起了灯火，暖了起来因此胀长的缘故。

上面这一段不可思议的奇妙论调，是从契诃夫一篇小说《顿河退伍的士兵》那里引来的，你看了一定会发笑。可是，笑这种说法的人，自己也时常会创造出许多同样不可思议的怪论来。譬如，常常听到有人说或者甚至在书上读到，说什么洗完澡以后，靴子所以穿不进，是因为“脚给热水烫热膨胀，因此增加了体积”。这个有趣的例子已经变成常见的例子，而一般

人常常做了完全不合理的解释。

首先，大家应该知道，人体在洗澡的时候温度几乎没有升高。在洗澡的时候人体温度升高一般不超过1摄氏度，至多是2摄氏度。人体机能会很好跟四周环境的冷热影响作斗争，使体温保持在一定的度数。

而且我们的身体温度即使增加了1～2摄氏度，体积增加得也非常有限，穿靴子的时候是绝对不会觉察到的。人体不管软的硬的各部分的膨胀系数都不超过万分之几。因此，脚板的宽窄和胫骨的粗细一共只能胀大百分之几厘米。那么，难道普通一双靴子，会缝制得精确到0.01厘米，像一根头发那么粗细的程度吗?

但是，事实却的确是这样：洗澡以后靴子的确很难穿进。不过穿不进的原因不在受热膨胀，而是在别的原因，例如充血、外皮肿起、皮肤润湿，以及别的许多根本跟热无关的现象。

“神仙显圣”是怎样造成的

古希腊机械师、亚历山大城的希罗是希罗喷水泉的发明人，他告诉我们两个巧妙的方法，它们是埃及的祭司曾经用来欺骗人们，叫他们相信“神仙显圣”的。

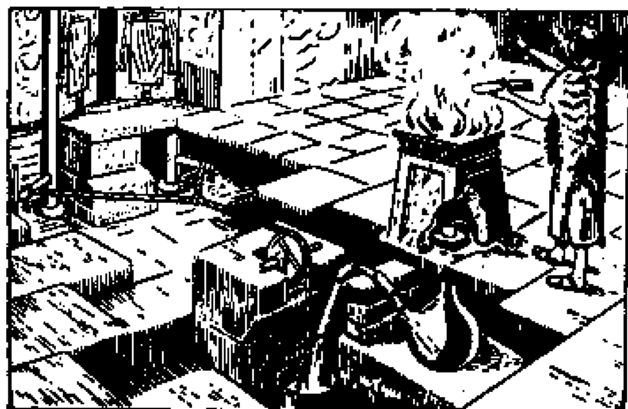


图67　埃及祭司“神仙显圣”的骗局
庙宇的大门由于祭坛烧火而打开

你在图67上可以看到一只空心的金属做的祭坛，下面的地下室里装着一个机构，用来



开动这座庙宇的大门。祭坛设在庙门外面。当坛里烧起火来的时候，下面的空气受到热，就要向地下那只瓶里的水加压力，把瓶里的水从旁边一个管子里压出来，流到桶里去，那桶一重就要落下去，带动一个机构转动起来，把门打开(图 68)。旁观的人谁也不会想到地下会有特别的装置，他们因此就看到了“神仙显圣”：只要祭坛上烧起火来，庙门就会“听从着祭司的祷告”自动打开了……

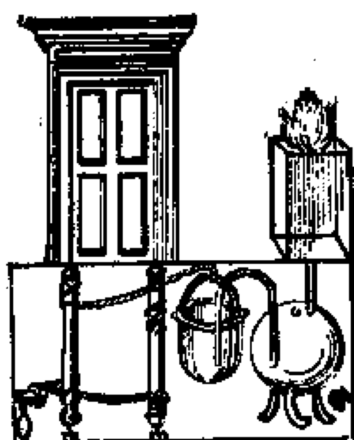


图 68 庙宇大门的构造
这座大门，当祭坛里烧起火来的时候会自动打开

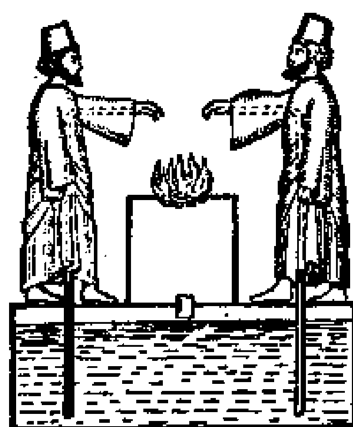


图 69 古时另外一个骗人的“神仙显圣”
油会自动加到祭火上去

祭司想出的另外一个骗人的“神仙显圣”，见图 69。当祭坛上烧起火以后，膨胀了的空气就把油从下面的油箱里压到两个祭司像里面的管子里，于是油就会自动加到火上去……但是只要管理这个祭坛的祭司悄悄地把油箱上的一个塞子拔掉，油就会不再流出(因为空气受热以后已经可以通过塞孔逃了出去)；这一手，祭司是预备碰到吝啬的祈祷人的时候用的。

不要发动的时钟

前面我们已经说过不要发动的时钟(见 99 面到 101 面)——说得更正确些，是不要人手发动的时钟——那种时钟的构造，是利用了大气压力的变化的。现在我们来谈一种利用热胀原理做成的这一类时钟。

这种时钟的构造见图 70。它的主要部分是两根长杆 Z_1 和 Z_2，两杆都用特别的合金制成，那种合金有极大的膨胀系数。

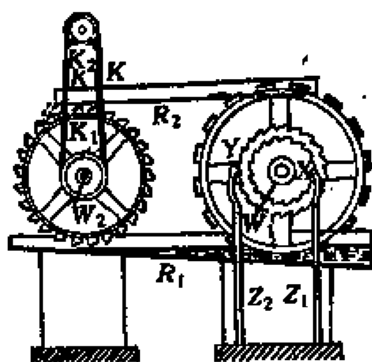


图 70　自己"发动"的时钟

Z_1 杆贴附在齿轮 X 的齿上，当这根杆受热伸长的时候，会把齿轮 X 略略推转。Z_2 杆却挂在齿轮 Y 的齿上，当它在受冷缩短的时候，会把齿轮 Y 也推向那同一方向转动，这两个齿轮(X，Y)装在同一根轴 W_1 上，这轴转动的时候，会把那个大轮带转，大轮上装有许多勺子。大轮转动的时候，下部的勺子会汲进槽里的水银，带到上边来，从这里流到左边的一个轮子，这个轮子也装有勺子。左边轮子上的勺子装满了水银，就会由于重力的作用转动起来，带动绕在 K_1 轮(K_1 和轮子装在同一根轴 W_2 上)和 K_2 轮上的链带 KK；K_2 轮就把时钟的弹簧带动。

左边轮子上流下来的水银怎么样呢?它会沿着斜槽 R_1 流回到右边大轮下面，再被右边大轮上的勺子提升上去。

这样看来，这个机构是应当动起来的，而且只要 Z_1、Z_2 两杆在伸长或缩短，它就不会停止下来。因此，为了发动这只时



钟，只要四周空气的温度不停地升降就可以。而实际上也正是这样，根本用不着我们操心：四周空气温度上的随便什么变化，总会引起长杆的胀缩，因此，时钟的发条就给慢慢地，但是不断地卷紧了。

这种时钟可以叫做“永动机”吗?当然不可以。是的，除非这只时钟的机构由于磨耗而损坏，否则就会永远走下去，但是它的动力来源却是它四周空气的热量：是热膨胀的功给这只时钟零碎地储藏了起来，以便把它不断消耗在时钟指针的运动上。这只是一架“不花钱”的动力机，因为它既不需要照料，也没有什么消耗。但是它却并不能够无中生有：它的动力的最初来源是晒热地面的太阳的热能。

另外一只这一类自己发动的时钟，见图 71 和图 72。这只时钟的主要部分是甘油，甘油能够随着空气温度的升高而膨胀，

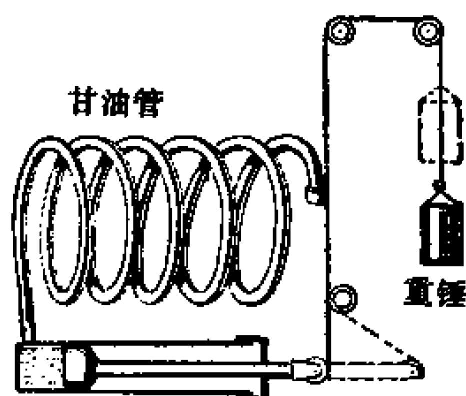


图 71　另外一只自己发动的时钟的构造

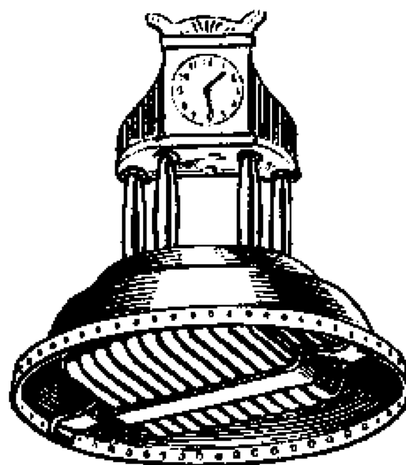


图 72　自己发动的时钟底座下面装有蛇形管，里面装了甘油

利用这一点来提升起一个小重锤；这个重锤落下的时候把时钟的机构带动。因为甘油只在零下 30 摄氏度才凝固，在 290 摄氏度才沸腾，因此这只时钟可以给城市广场和别的开阔的地方应用。只要温度的变化达到 2 摄氏度，就可以使这只时钟走动。有一只这样的时钟就曾经给试验过，它在一年里面走得非常

好，而在这一年里没有人去动过它一次。

那么，根据上面的原理，造出比较大的动力机是不是有利呢?初看这种“不花钱”的动力机应该是非常经济合算的，可惜计算告诉我们的是另外一个答案：为了把一只普通时钟上的发条旋紧，使它能够走足一昼夜，大约一共要$\frac{1}{7}\times9.8$焦的功。这大约等于每秒钟要用$\frac{1}{6\times10^5}\times9.8$焦；我们知道1马力等于735瓦，因此，一只时钟的功率大约等于一马力的四千五百万分之一。于是，假如我们把前面那只时钟两根膨胀的长杆或者第二只时钟的附件算作值1分钱，那么，这种发动机发出735瓦需要资本：

$$1分\times45\ 000\ 000=450\ 000元。$$

就是说每1马力的这种发动机需要近50万元，这对于“不花钱”的发动机来说，恐怕是太贵了吧。

值得研究的香烟

火柴盒上放着一支香烟(图73)，这支香烟从两端冒出烟来，但是，从纸烟嘴冒出的烟是向下沉的，另外一端，就是燃着的那一端的烟却是向上冒的。为什么呢?难道同一支烟的两端，冒出的烟不一样吗?

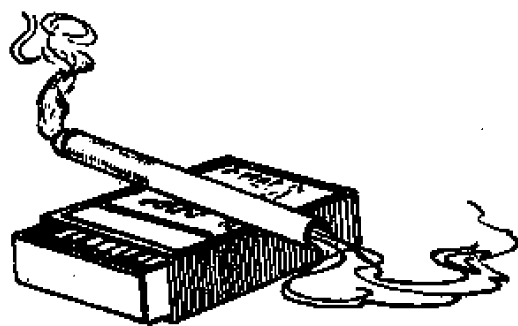


图73　为什么香烟一端的烟向上升，另外一端的烟向下沉

不错，两端冒出的烟是一样的，但是在燃着的那端，烧热的空气造成了上升气流，是它把烟带着上升的；至于从烟嘴出来的烟和空气，已经冷却了，因此就不会上升，而烟粒本身要比



空气重，因此就沉下去了。

在开水里不融化的冰块

把一小块冰丢到装满水的试管里去，由于冰比水轻，要想不让冰块浮起，再投进去一粒铅弹、一个铜圆等等去把冰块压在底下；但是不要使冰跟水完全隔离。现在，把试管放到酒精灯上，使火焰只烧到试管的上部(图 74)。不久，水沸腾了，冒出了一股一股的蒸汽。但是，多奇怪呀，试管底部的那块冰却并没有融化！我们好像是在表演魔术：冰块在开水里并不融化……

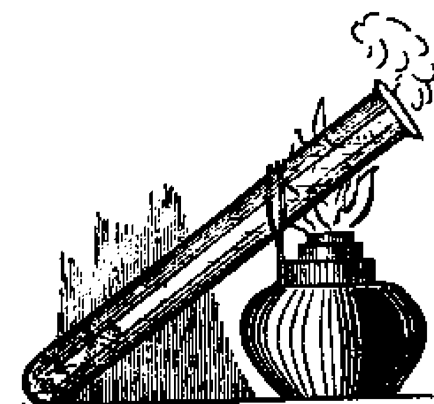


图 74　试管上部的水已经沸腾，但是下部的冰块没有融化

这个谜的解释是这样的。试管底部的水根本没有沸腾，而且仍旧是冷冰冰的，沸腾的只是上部的水。我们这儿并不是什么“冰块在沸水里”，而是“冰块在沸水底下”。原来，水受了热膨胀，就变得比较轻，因此不会沉到管底，仍旧留在管的上部。水流的循环也只在管的上部进行，没有影响到下部。至于下部的水，只能经过水的导热作用才受到热，但是，你知道水的导热度是很小的啊。

放在冰上还是冰下

我们烧水的时候，一定把装水的锅子放在火上，不会放到火

的旁边。这样做是完全正确的，因为被火焰烧热了的空气比较轻，从四周向上升起，绕着水锅的四周升上去。

因此，我们把水锅放在火上是最有效地利用了火焰的热量。

但是，假如我们想用冰来冷却一个什么物体的时候，要怎样做呢？许多人根据一向的习惯，把要冷却的物体也放到冰的上面。譬如说，他们把装有热牛奶的锅子放在冰上面。这样做其实是不适当的，因为冰上面的空气受到冷却后，就会往下沉，四周的暖空气就来占据冷空气原来的位置。这样你可以得到一个非常实际的结论：假如你想冷却一些饮料或者食物，千万不要把它放在冰块的上面，而要把它放在冰块的底下。

让我们再解释得详细些：假如把装水的锅子放在冰块的上面，那么受到冷却的只有那水的底部，水的别的部分的四周仍旧没有冷却的空气。相反，假如把一块冰放在水锅的上方，那么水锅里的水的冷却就会快得多，因为水的上层冷却以后，就会降到下面去，底下比较暖的水就会升上来，这样一直到整锅水全部冷却为止。[1] 从另一方面说，冰块四周的冷却了的空气也要向下沉，绕过那个水锅。

为什么紧闭了窗子还觉得有风

时常会有这样的情形：房间里的窗子关闭得非常紧密，没有丝毫漏缝，竟仍旧会觉得有风。这好像很奇怪。但是事实上却没有什么可以奇怪的。

房间里的空气几乎没有完全安定的时候。房间里面总有一

[1] 在这种情形下，清水只会冷却到4摄氏度（这时候它的密度最大），而不会冷却到0摄氏度；但是在实际生活中，一般也并没有必要把饮料冷却到0摄氏度。

些看不出的空气流，这种空气流是由于空气的受热或冷却引起的。空气受热，就会变得比较稀，因此也就变得比较轻；受冷呢，相反的，就会变得比较密，也就变得比较重。给电灯或炉子烧热了的比较轻的暖空气，会给冷空气挤压向上升，升到天花板；而靠近冷窗子或墙壁的比较重的冷空气，就要向下沉，沉到地板上。

关于房间里面的这种空气流，我们可以利用孩子们玩的气球来观察，在一只气球下面系上一个小物体，使得这个气球不会一直飞到天花板，只能够飘浮在空中，于是，把这只气球放在熊熊的火炉旁边，它就会受到看不见的空气流带动，在房间里慢慢地旅行起来。首先从炉子旁边升到天花板底下，然后飘到窗子旁边，从那里落到地板上，又回到炉子旁边，重新绕着房间打圈子。

冬天窗子虽然关闭得非常紧密，房间外面的寒气不可能透进里面来，而我们却仍旧会感觉有风在吹着，特别在脚下更显著，原因就是这样。

神秘的纸片

请你把一张薄纸剪成长方形，按照它的横直两条中线各对折一次，再把纸展开，你一定知道，两条折痕的交点就是这张长方纸片的重心。现在，把这张纸片放到一根竖立着的针的针尖上，使针尖恰好顶着这一点。

这张纸片会在针尖上保持平衡，因为针是顶在它的重心上。这张纸片如果受到一阵微风吹动，就会很快旋转起来。

起初，这个小玩意还看不到什么神秘的现象。现在你把手放到这张纸片旁边，像图 75 的样子；注意手要轻轻移过去，不

要让手移动时候的风把纸片吹落。奇怪的现象发生了：纸片旋转起来，起初还慢，渐渐快起来了。可是如果你把手悄悄地拿开，纸片立刻就会停止旋转；把手移近，纸片又旋转起来。

这个谜一般的旋转现象，在 19 世纪 70 年代里，曾经有过一个时期使许多人认为人体有某种超自然的能力。信奉神秘教的人们，就认为这个实验恰好证实了他们的“人体能够发出神秘力量”的模糊的学说。但是实际上这件事情的原因非常自然而且简单：下部的空气给你的手掌温暖了就向上升起，它碰到纸片，纸片就旋转起来，就像放在灯上的纸条卷会转动一样，因为纸片曾经折过，就造成了略略的倾斜。

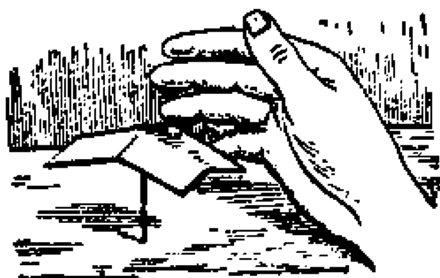


图 75　为什么纸片会转起来

细心的人在做这个实验的时候，一定会发现这个纸片总是按照一个方向旋转，它总是从手腕这边向手指那边转过去。这一点，解释起来也很容易。人手各部分的温度是不同的：手指端上的温度总比掌心低；因此，接近掌心的地方，就会造成比较强的上升气流，它对纸片所加的力也比手指那边大。[1]

皮袄会给你温暖吗

假如有人一定要你相信，说皮袄根本一点也不会给人温暖，你要怎样表示呢?你一定会以为这个人是在跟你开玩笑。但是，假如他用一连串的实验来证明他的话呢?譬如说吧，你可以

〔1〕如果高热病人或者体温比较高的人来做这个实验，纸片就旋转得更快。



做这样一个实验。拿一支温度计，把温度记下来，然后把它裹在皮袄里。几小时以后，把它拿出来。你会看到，温度计上的温度一点也没有增加：原来是多少摄氏度，现在还是多少摄氏度。这就是皮袄不会给人温暖的一个证明。而且，你甚至可以证明皮袄竟会把一个物体冷却。拿一盆冰裹在皮袄里，另外拿一盆冰放在桌子上。等到桌子上的冰融化完之后，打开皮袄看看：那冰几乎还没有开始融化。那么，这不是说明皮袄不但不会把冰加热，而且还使它的融化减慢吗?

你还有什么说的呢?你能够推翻这个说法吗?你没有办法推翻的。皮袄确实不会给人温暖，不会把热送给穿皮袄的人。电灯会给人温暖，炉子会给人温暖，人体会给人温暖，因为这些东西都是热源，但是皮袄却一点也不会给人温暖。它不会把自己的热交给别人，它只会阻止我们身体的热量跑到外面去。正是因为这个缘故，温血动物的身体是一个热源，他们穿起皮袄来会感到温暖。至于温度计，它本身并不产生热，因此，即使把它裹在皮袄里，它的温度也仍旧不变。冰呢，裹在皮袄里会更长久地保持它原来的低温，因为皮袄是一种不良导热体，是它阻止了房间里比较暖的空气的热量传到里面去。

在这个意义上，冬天下的雪，也会跟皮袄一样地保持大地的温暖；雪花和一切粉末状的物体一样，是不良导热体，因此，它阻止热量从它所覆盖的地面上散失出去。用温度计测量有雪覆盖的土壤的温度，知道它常常要比没有雪覆盖的土壤的温度高出 10 摄氏度左右。雪的这种保温作用,是农民最熟悉的。

所以，对于“皮袄会给我们温暖吗”这个问题，正确的答案应该是，皮袄只会帮助我们自己给自己温暖。如果把话说得更恰当一些，可以说是我们给皮袄温暖,而不是皮袄给我们温暖。

我们脚底下是什么季节

当地面上已经是夏天的时候，地底下，譬如说地面以下 3 米的地方，正是一个什么季节呢?

你以为那儿也同样是夏天吗?错了！地面上的季节和地底下的季节，并不像我们平常所想象的那样以为它们是相同的，实际上它们根本不相同。土壤是很难导热的。比方说在列宁格勒，即使在最严寒的冬天，装在地面以下 2 米深的自来水管就不会冻裂。地面以上温度的变化，要很久才能够传到地面下很深的土壤，土壤层越深的，这个落后的时间也越久。举例来说，在列宁格勒州斯卢茨克地方做的直接测量就告诉我们，在 3 米深的地方，一年里面最暖时间的到来要比地面上迟 76 天，而最冷时间的到来要迟 108 天。这就是说，假如地面上最热一天是 7 月 25 日，那么在 3 米深的地下，最热一天要等到 10 月 9 日才到来！假如地面上最冷一天是 1 月 15 日，那么在 3 米深的地下，最冷一天要在 5 月间才到来！至于更深的地方，这个落后的时间也就更长。

向土壤进入越深，温度的变化不但要在时间上落后，而且还逐渐减弱，到了某一个深度，还完全停止了变化。在这种地方，成年成世纪地都只有同一个固定不变的温度，这就是那个地方的所谓全年平均温度。巴黎天文台的地窖里，在 28 米深的地方有一只温度计，这只温度计还是拉瓦锡放在那里的，已经近 200 年了，在这样长的一段时间里，这只温度计指出的温度竟一点也没有变过，始终是同一的温度(11.7 摄氏度)。

所以，在我们脚底下的土壤里，从来没有跟我们这儿同样的季节。当我们这里已经是冬天的时候，3 米深的地方还只是秋



天——还不是地面上有过的那样的秋天，而是温度减低更缓和的秋天；而当我们这里到了夏天的时候，地底下还在过着冬天严寒的尽头呢。

这件事情，对于研究地下动物(例如金龟子的幼虫)和植物地下部分的生活条件，是非常重要的。譬如，各种树木根部细胞的繁殖所以在天冷季节进行，根部的所谓形成组织所以几乎在整个温暖季节里停止活动，恰跟地面上树干的情形相反，根据上面所说的，我们也就不应该有什么奇怪。

纸制的锅子

请看图76，鸡蛋放在纸锅里煮着！“纸要立刻烧起来，水就会把火浇熄的。”你一定会这样说。但是，请你先拿厚纸和铁丝做一个纸锅来实验一下。你就会相信，你的纸锅一点也不会给火烧坏。原因是，水在开口的(不是密闭的)容器里面，只能煮到沸腾的温度，就是100摄氏度；锅里煮着的热容量相当大的水，吸收了纸的多余的热量，不让纸热到比100摄氏度高多少，就是不使它达到能够燃着的温度(更切实些的实验，是用小



图76　在纸锅里面煮鸡蛋

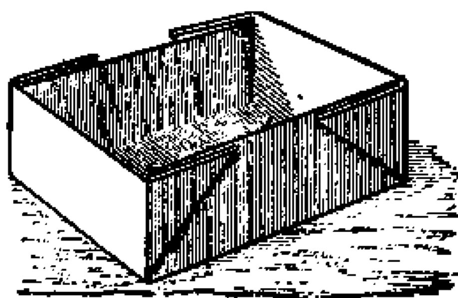


图77　用来烧开水的纸盒子

纸盒来做的，纸盒形状像图 77 所示)。因此，虽然火焰不断舐着纸锅，纸并不会起火燃烧。

不小心的人会把空壶放到炉子上，因此使壶底的焊锡熔化了，这个叫人懊丧的经验也属于同一类的现象。这原因很明显，焊锡比较容易熔解，只有水贴近它的时候才会使它不受到过高的温度。同样，有焊接部分的锅子也不可以不放水就直接放在火上。在马克沁式的机关枪上，正是利用水防止了枪筒的熔化。

你还可以做这样的一个实验，把一块锡块放在卡片纸做的纸盒里来熔化，只要使火焰恰好舐着锡块和纸盒接触的地方，那么，由于锡块是一个比较好的导热体，就会很快地从纸上把热量吸过去，不让纸的温度升到比锡的熔点也就是 335 摄氏度高得太多。这样的温度还不会使纸烧着。

下面的一个实验也很容易做(图 78)：用狭长纸条像螺丝般紧裹在一枚粗铁钉或者一根铁杆(最好是铜杆)上面，然后把它送到火上去。熊熊的火焰虽然舐着这纸条，但是在钉子烧红之前，纸条不会烧起来。这个现象的解释很简单：钉子(或铜杆)的导热度很大；同样的实验，如果改用导热度小的玻璃棒，就不能成功了。

图 79 表示一个和上面所说相仿的实验，是把棉线紧绕在一柄钥匙上。

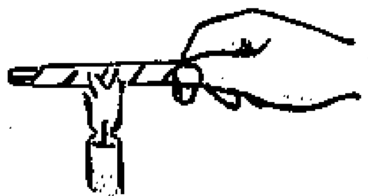


图 78　烧不着的纸条

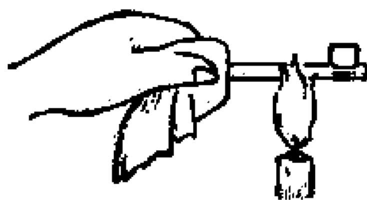


图 79　烧不着的棉线



为什么冰是滑的

在擦得光光的地板上，要比在普通地板上容易滑倒。这样看来，冰上也应该一样，就是光滑的冰应该比凹凸不平的冰更滑了。

但是，假如你曾经在凹凸不平的冰面上拖过满载重物的小雪橇，你就会相信，雪橇在这种冰面上行进，竟要比在平滑的冰面上省力得多。这就是说，不平的冰面竟比平滑的冰面更滑！解释是，冰的滑性主要并不因为它平滑，而是完全由于另外的一个原因，就是当压强增加的时候，冰的熔点要减低。

让我们分析一下，当我们溜冰或者乘雪橇滑行的时候，究竟发生一些什么事情。当我们穿了溜冰鞋站在冰上的时候，用鞋底下装着的冰刀的刃口接触着冰面，我们的身体是只支持在很小很小的面积上——一共只有几平方毫米的面积上。你的全部体重就压在这样大小的面积上。假如你想起前面第二部分里所谈的关于压强的问题，你就可以明白，溜冰的人对于冰面所加的压强是极大的。在极大压强的作用下，冰在比较低的温度也能够融化；比方说，现在冰的温度是零下 5 摄氏度，而冰刀的压力把冰刀下面的冰的熔点还不止减低 5 摄氏度，那么这部分的冰就要融化了。[1] 那时候就怎么样了呢?那时候在冰刀的刃口和冰面之间产生了一薄层的水——于是，溜冰的人可以自由滑溜了。等他的脚滑到了另外一个地方，发生的情形也是一

---

〔1〕理论上可以算出，要使冰的熔点降低 1 摄氏度，每平方厘米上要有 130 千克的大压力。但是这是指冰融化的时候冰和水都是在同一压强下说的。而在现在我们所举的一些例子里，受到压力的只是冰，至于因此产生的水，它只受到大气的压强；在这样的情形下，压力对于冰的熔点的影响要大得多。

样。总之，溜冰的人所到的地方，在他的冰刀下面的冰都变成了一薄层水。在现有各种物体当中，还只有冰具有这种性质，因此一位物理学家把冰称做“自然界惟一滑的物体”。其他物体只是平滑，却不滑溜。

现在我们可以谈到本节的题目上来了：光滑的还是凹凸不平的哪个更滑。我们已经知道，冰面给同一个重物压着，受压面积越小，压强就越大。那么，一个溜冰的人站在平滑的冰面上，对支点所加的压强大呢，还是站在凹凸不平的冰面上所加的压强大？当然在凹凸不平的情形压强大：因为在不平的冰面上，他只被支持在冰面的几个凸起点上。而冰面的压强越大，冰的融化也越快，因此，这冰也就显得更滑了(这个解释只对于刀刃比较钝的冰刀是适用的，对于刀刃锋利的冰刀，因为它会切割到冰的凸起部分里去，所以上面所说是不适用的——在这个情形下，运动的能量要消耗到切割凸起部分上面去)。

日常生活里有许多别的现象，也可以用冰在大压强下面熔点减低的道理来解释。两块冰叠起来用力挤压，就会冻结成一块，正可以用这个道理来说明。孩子们在捏雪球的时候，无意识地正是利用了这个特性，雪片在受到压力的时候，减低了它的熔点，因此有一部分融化了，手一放开就又冻结起来。我们在滚雪球的时候，也是在运用冰的这个特性：滚在雪上的雪球因为它本身的重力使它下面的雪暂时融化，接着又冻结起来，沾上了更多的雪。现在你当然也会明白为什么在极冷的日子，雪只能够给捏成松松的雪团，而雪球也不容易滚大。人行道上的雪，经过走路的人践踏以后，也因为这个缘故，会逐渐凝成坚实的冰，雪片冻成了一整层的冰块。



冰柱的题目

你可曾想过这样的一个问题：我们时常看见的屋檐上垂下来的冰柱，它们是怎样形成的？

这些冰柱是在怎么样的天气形成的呢？在暖和的日子里还是在严寒的日子里？假如说是在温度为0摄氏度以上的暖和日子里，那么它怎么会凝结成冰柱呢？假如是在严寒日子里，那么，在一座没有生火的住宅屋顶，又哪里来的水呢？

现在你已经看出这个题目不很简单了。要形成冰柱，一定要同时有两种温度，一种是0摄氏度以上的温度，能够使积雪融化；一种是0摄氏度以下的温度，能够使雪水冻结。

事实上正是这样：倾斜的屋顶上的积雪在融化，因为太阳光把它晒到0摄氏度以上的温度了；融化以后的雪水流到屋檐上却又冻结了，因为这儿的温度是在0摄氏度以下（当然，我们说的不是那种由于室内温度产生冰柱的情形）。

试想象有这样一幅图画：晴朗的天气，温度只有零下1～2摄氏度。太阳光正照在一切物体上。但是这些斜射过来的光线



图80 太阳光把倾斜的屋顶晒得比水平的地面更热
（图上数目字表示太阳光线跟它射到的平面所成的角度）

并没有能够使地面上的雪融化。这里值得注意的是，在正对太阳的倾斜屋顶上，太阳光并不像对于地面那么偏斜，而是用比较陡峭接近直角的角度射下来的。大家知道，太阳射下的光线跟射到的平面所成的角度越大，这个平面给太阳晒热的程度也越大(太阳光线的晒热作用，跟这个角度的正弦值成正比；就像图 80 所示的情形，屋顶上的雪受到的热是地面的雪的 2.5 倍，因为 $\sin 60°$大约是 $\sin 20°$的 2.5 倍)。屋顶斜面上所以晒得比较热，原因就在这里，因此，雪就融化了，雪水一滴一滴从屋檐流下。但是屋檐底下的温度是比 0 摄氏度低的，同时水滴还要因为蒸发作用而冷却，自然要凝结起来。接着第二滴雪水流到这已经凝结的冰滴上，也冻起来；这样下去，逐渐形成了一个小小的冰球。这些冰球逐渐加长起来，结果就形成了挂在屋檐下的冰柱。不生火的住宅或仓库的屋檐所以时常会产生这种冰柱，原因就是这样。

我们用同样的理由还可以来解释范围比较大的现象。你知道不同的气候带以及一年四季的温度上的区别，大部分是跟太阳光线射到的角度有关的呀。[1] 太阳离我们的距离，夏天和冬天大约相等；太阳离两极和赤道的距离也差不多一样(虽然略有些出入，但是不起什么作用)。但是，太阳射到地面的光线，在赤道上要比在两极上陡直；而且，这个角度夏天又比冬天大。正是这个原因，才造成了白天里温度的显著变化，也就是说，引起了整个大自然界生活上的显著变化。

---

[1] 只是“大部分”，而不是全部分。另外一个重要的原因是白昼时间的长短不同，也就是说，太阳射到地面上的时间长短不同。其实，这两个原因是由于同一个天文事实，就是地轴对于地球绕日公转的轨道面是倾斜的。





7 光 线

捉　影

唉，影子啊，黑暗的影子，
有谁不被你追上？
有谁不被你追越？
只有你，黑色的影子，
却没人能把你捉到和拥抱！

——涅克拉索夫

假如说，我们的祖先不会捉自己的影子，至少他们已经会从自己的影子那里得到一些好处。他们利用影子，可以画出人体的“影像”。

在我们的时代里，靠了照相术的帮助，每个人都能够得到自己的照片或是替亲近的人拍照。但是在18世纪的时候，人们却还没有这种幸福：当时要请画家画一幅像，得付出很多的钱，就只有不多的人能够出得起这笔钱。因此，“影像”才得到了这样大的流行，在当时，这种“影像”竟相当于现在的照相术这样普遍。所谓“影像”，其实可以说是捉到并且钉住在纸上的影子。这种“影像”，是用很机械的方法画出的，这一方面，使我们不由得想起了它跟照相术刚好相反。我们在拍照的时候，是利用光线射到底片上，而我们的祖先为了同一个目的却是利用了影子。

影像怎样画法，从图81可以看得很清楚。那个人的头转到某一个位置，使它的影子有最显著的轮廓，然后用笔描出它的轮廓来。这个轮廓画好以后，涂满黑墨，剪下贴到一张白纸上，影像就成功了。愿意的话，可以利用放大尺把它缩小(图82)。



图 81　从前画制影像的方法

你可别以为这种简单的黑色轮廓画不可能表示那个人形貌上的特点。相反的，画得好的影像有时候跟原来的形貌非常相像。

这种影像的特点是画法简单，又跟原来的形貌相像，这使得许多画家对它发生了兴趣，他们开始用同样方法画整幅的图画、风景等等，渐渐地发展成为一个画派。图 83 就是席勒的影像。

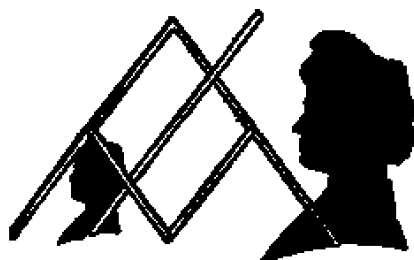


图 82　影像的缩小

“影像”这个名称，是从法文 Silhouette（西路哀特）这个字译过来的。这个字的来源很有趣，本来是 18 世纪中叶一位法国财政大臣的姓，那位大臣叫艾奇颜纳·德·西路哀特，他在当时曾经竭力号召浪费成性的法国国民注意节俭，并且责备法国显贵们不应该把大量金钱消费到图片和画像上。由于影像很便宜，顽皮的人就把这种影像叫做“à la Silhouette”（意思就是“西路哀特式”）。



图 83　席勒的影像（1790 年）

鸡蛋里的鸡雏

你可以利用影子的特性，向你的同伴表演一个有趣的玩意

儿。拿一张浸过油的纸，把它粘在一张硬纸板中间的方孔上，就装配成一个油纸幕。幕的后面放两盏灯；请你的观众在幕的前面观看。现在，把一盏灯点起，譬如把左面的一盏灯点起。

在点起了的灯跟纸幕之间，加进一个椭圆形的硬纸片，于是幕上就现出了一个鸡蛋的影像(这时右面一盏灯还没有点燃)。现在你可以向你的观众说，就要开动X射线透视机了，就可以透视到鸡蛋的内部……看到鸡雏了！果然，一下子你的观众就会看到那鸡蛋边上仿佛比较明亮，中心部分却暗了下去，清楚地看到了一只鸡雏的影像(图84)。

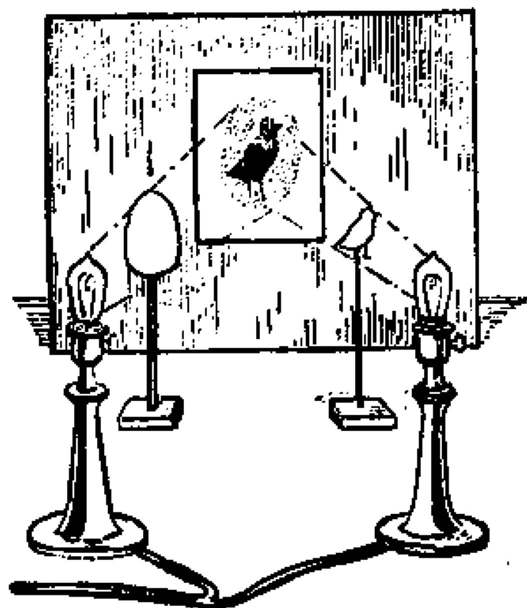


图84　假的X射线透视

其实这出魔术没有多大奥妙，说穿了很简单：在你右面那盏灯的前面，放着一个鸡雏形的硬纸片。把这盏灯点亮以后，幕上那椭圆形的影子上，又有右面的灯射来的一个“鸡雏”的影子，而鸡雏影子四周受到右面灯光的照射，因此，“鸡蛋”的边上要比它的中央部分明亮。你的观众呢，他们是坐在幕的前面的，并没有看到你的动作，因此——假如他们不懂物理学和解剖学的话——很可能就给你骗了，以为你果真让X射线透过了鸡蛋。

滑稽的照片

许多人一定还不知道，照相机即使没有放大玻璃(镜头)，也



可以用它那小圆孔拍得出照片来，不过拍出的照片当然没有那么清晰罢了。这种“没有镜头的镜箱”里，有一种“狭缝”镜箱，是用两条狭缝代替小圆孔的，这种镜箱会使你看到极有趣的变形。这种镜箱的前面有两块板，一块板上开一条竖直的狭缝，另一块板上开一条水平的狭缝。假如把这两块板紧贴在一起，那么所得到的像就跟小孔镜箱一样，可以得到正常的没有歪曲的像。但是，假如把两块板离开一些(这两块板装成可以活动的)，那么所得到的像就会给歪曲成离奇的形状(图 85 和 86)。你所看到的可以说不是照片，而是滑稽画。



图 85　用狭缝镜箱拍得的滑稽画式的照片
它在横的方向变了样



图 86　用狭缝镜箱拍得的滑稽画式的照片
它在竖的方向变了样

这种歪曲要怎样解释呢?

让我们试把水平狭缝放在竖直狭缝前面来研究一下(图 87)。光线从物体 *D*(十字形)的竖直线透过 *C* 缝的时候，那情形就跟透过普通的小孔一样；至于后面那竖直狭缝 *B* 对于这道光线的行进已经没有起什么作用。因此，映在镜箱后面毛玻璃 *A* 上的物体 *D* 的竖直线的像对原来竖直线的比，就要依 *AC* 距离对 *DC* 距离的比来决定。

但是，如果两块狭缝板的位置仍旧不变，物体的水平线映

在毛玻璃上的形状就完全两样了。这条线的光线可以没有阻碍地通过第一道狭缝(水平狭缝)，一直射到 *B* 缝；通过 *B* 缝(竖直狭缝)的时候，这道光线仿佛通过一个小孔一样，而在毛玻璃 *A* 上映出一个像来，这像的大小对原来水平线的比，与 *AB* 距离对 *DB* 距离的比相等。

简单地说，在两块狭缝板的位置像图 87 所示的情形时，对于物体的竖直线，仿佛只有前面一条缝 *C*,而对于物体的水平线,却仿佛只有后面的一条缝 *B*。因为前面那块板比后面那块板

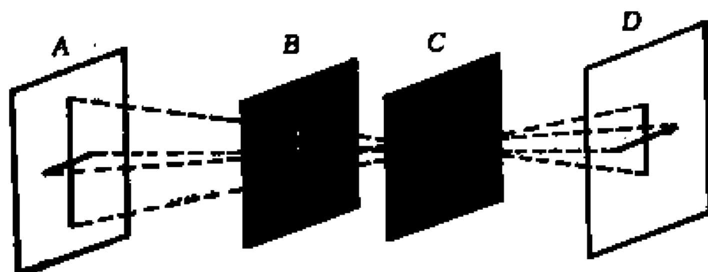


图 87　为什么狭缝镜箱会拍出歪曲的像

离毛玻璃远，所以物体在毛玻璃上的像在竖直方向上应该比水平方向上放得更大，就是物体的像仿佛沿竖直方向拉长了一般。

反过来说，如果两个狭缝的位置跟图 87 相反，所得到的像就会向横的方向伸长(比较图 85 和图 86)。

自然，假如两条狭缝是斜放的，就会得到另外一种歪曲的情形。

这种镜箱不但可以用来拍取滑稽画式的照片，它还可以担任更加重要的实际任务，例如，可以用来得到建筑物装饰图案，地毡花样等的图案——总之，用来得到拉长或压扁了的各种装饰和图案。



日出的题目

你在早晨5点正看到日出。但是大家都知道，光的传播不是瞬息就可以到达的：太阳光从光源——太阳——射到地球上人的眼里，要有一段时间。因此，我们可以提出这样一个问题：假如光是瞬时就可以到达的话，那么我们在什么时候就可以看到日出了呢？

我们知道，光从太阳到地球要跑8分钟。那么，如果光瞬息就可以到达的话，我们好像应该在8分钟以前，就是在4点52分就看到日出了。

我知道许多人听了会觉得意外：其实这个想法是不正确的。所谓日出只是我们地球表面上某一点从没有太阳光照到的地方转到了有太阳光照到的地方罢了。因此，即使光的传播是瞬时的，我们看见日出的时间，仍旧跟光的传播要花时间的情形完全相同，也就是说，仍旧是早上5点正。[1]

但是如果你是在观察(用望远镜)太阳边缘上什么凸起的部分(日珥)，那又是另外一回事了。如果光的传播是瞬时的，你的确会比现在早8分钟就见到它。

---

〔1〕假如把所谓“大气折射”的作用也计算在内，那么结果就更会出人意外。大气折射会使空气里光线的行进路线发生曲折，因此使我们看到日出的时候，要比太阳从地平线升起的时间更早。但是如果光的传播是瞬时的，就不可能有这种折射发生，因为折射只是由于各种不同介质里光速不同才产生的。没有折射，会使观察的人看到日出的时间比光的传播要花时间的情形更迟；这个差别的多少要由观测地点的纬度、空气温度和许多别的条件来决定，大约迟2分钟到几昼夜或者更多(在极地上)。这样看来，我们是得到一个好像很奇怪的结论了：如果光的传播是瞬时的(就是无限快的)，我们看到日出的时间，竟要比不是瞬时的更迟！



8 光的反射和折射

隔着墙壁看得见东西

在 19 世纪的 90 年代，人们用“X 射线机”这个响亮的名字到处售卖一种有趣的器具，当时我还是一个小学生。我还记得，第一次拿到这个巧妙玩意儿时的高兴心情。这是一个管子，可以使你隔着不透明物体清楚地看到后面的一切东西！我曾经用它不但隔着厚纸，还隔着真正的 X 射线都透不过的刀锋看到了后面的东西。这玩意儿构造并不复杂，只要看一看图 88 就可以明白。原来那个管子里有四面装成 45 度倾斜的平面镜，

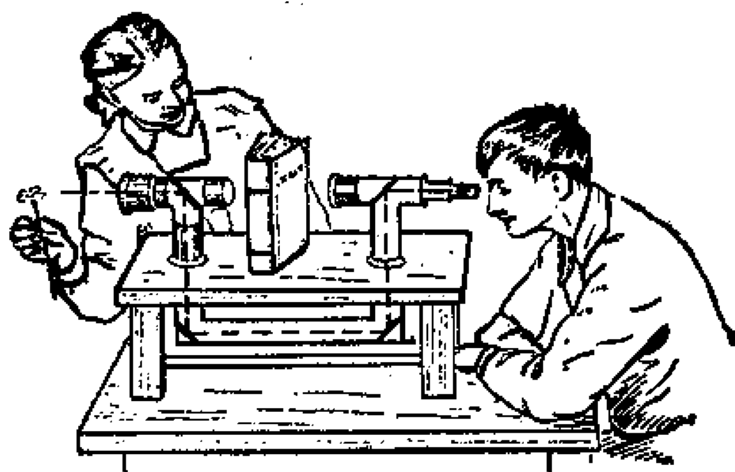


图 88　假的 X 射线机

把光线反射几次，这个光线就仿佛绕过了不透明的物体一般。

这一类东西在军事上得到了广泛的应用。战士们坐在战壕里，可以不必把头探出战壕外面就能够望到敌人，他们只要向一架叫做“潜望镜”的仪器里望去就得了(图 89)。

光线从进入潜望镜折射到观察人的眼睛，这一段路程越长，潜望镜所能够看到的视界就越小。要把潜望镜的视界放大，就得装置一连串的镜片。但是玻璃是会吸收一部分通过潜



望镜的光线的，因此所望到的物体的清晰度会受到影响。这一点使潜望镜的高度受到一定的限制，最高只能够到20米左右；更高的潜望镜只能够有极小的视界和不清楚的景象，特别是在天气阴暗的时候。

潜水艇上的人员向他准备攻击的敌舰观测，也是使用潜望镜(图90)的——这是一根长长的管子，上端露在水面上。这种潜望镜要比陆地用的那种复杂得多，但是原理却完全相同。光线从装在潜望镜上端的平面镜(或三棱镜)反射过来，沿着管子向下，经过底部的平面镜反射以后，落入人的眼里。



图89 第一次世界大战时候用的潜望镜

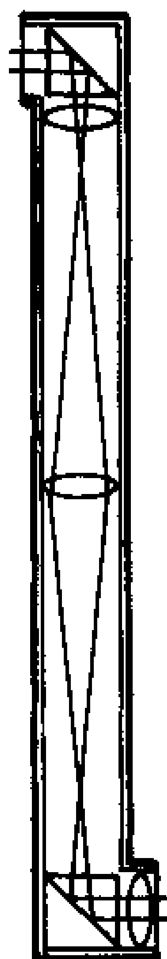


图90 潜水艇上用的潜望镜的构造

放在前面还是后面

家庭日常生活里有不少的事情，许多人是在很不合理地做着的。我们前面已经说过，许多人不会使用冰来冷却食物——他们不知道应该把食物放到冰的下面，却把它放到冰的上面去。就连



镜子这样普通的东西，到现在还不见得每个人都会正确使用它。许多人照镜子的时候，总把灯放在身后，想“照亮镜子里面的像”，不知道要照亮的正是他自己！

许多妇女都是这样做的，我们这本书的女读者，无疑会是把灯放在前面的人。

镜子可以看得见吗

这儿又是一个实例，说明我们对于普通镜子还认识不够：对于这一节的题目，就一定有许多人，尽管每天都在看镜子，却还是会回答得不正确。

谁要是认为镜子是可以看得见的，那他就错了。一面光洁的极好的镜子是看不见的。能够看得见的只是镜框、玻璃的边缘，以及一切映在镜里的像——但是镜子本身，只要它没有污点，是看不见的。一切有反射作用的表面——不是漫射的表面——本身都是看不见的(所谓漫反射的表面，是指把光线向各方面反射出去的表面。我们平常把反射表面叫做磨光面，漫射表面叫做磨砂面)。

所有利用镜子所作出的表演或者观察——就像方才那两节所叙述的一样，都是根据镜子本身看不见的这个特性。看得见的只是镜子里反映的物体。

在镜子前面画图

镜里的像跟原物不相同，从下面的实验里可以更明显地看



出来(图 91)。

在你面前竖直地放一面镜子，在镜子前面的桌子上铺一张纸，请你在这张纸上画一个随便什么图，比方说画一个长方形和一条对角线。但是画的时候眼睛不许望着手，只许看着镜子里的手的像。

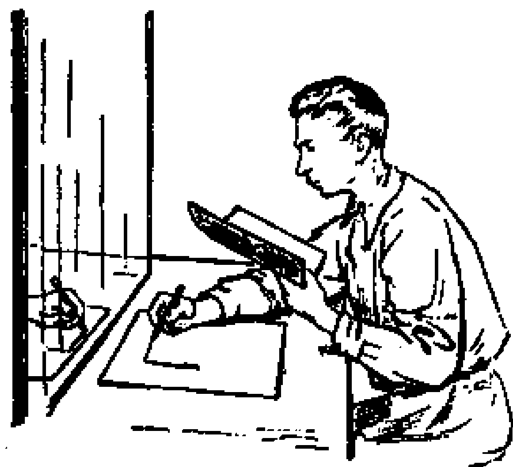


图 91　在镜子前面画图

你一定就会发觉，本来是非常简单的一个题目，竟简直没有法子交卷。多年来，我们的视觉已经跟动作的感觉得到了协调，但是镜子破坏了这种协调，因为它把我们手部的动作变了样。我们多年的习惯要对你每一个动作抗议，你想把一条直线画向右面去，但是你的手却要向左边移去，等等。

假如你在镜子前面画的不是那么简单的图，而是比较复杂的图，或者是写些什么东西，那么，只要你的眼睛是向镜里的像看着，就会更加出你意外，你得到的会是一幅非常可笑的混乱的图画！

吸墨纸上吸印的字，也是反转的。试把一张吸墨纸上吸印到的字迹一一读出来，我相信你会觉得很困难：所有的字都跟平常不同。但是，试把一面镜子直竖在这吸墨纸前面，你就可以看到镜子里的字迹跟平常的完全一样了。是镜子把吸墨纸从普通字迹上印到的反了的字迹又反了一次。

捷 径

我们都知道，光在同一种介质里的传播是依直线行进的，也就是说是依最短的路径行进的。但是，当光从一点射出不是直接射到另一点，而是经过镜面的反射射到另一点的时候，光也仍旧是依最短的路径行进的。

让我们跟着光的路径看去。假设图92上 *A* 点表示光源，*MN* 线表示镜面，*ABC* 线表示光从蜡烛到人的眼睛 *C* 的路径。直线 *KB* 跟 *MN* 垂直。

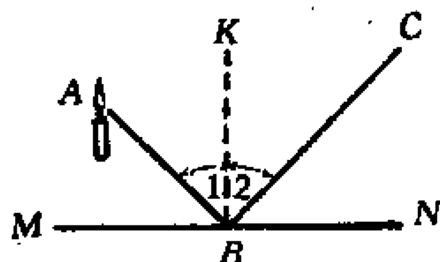


图92 反射角2等于入射角1

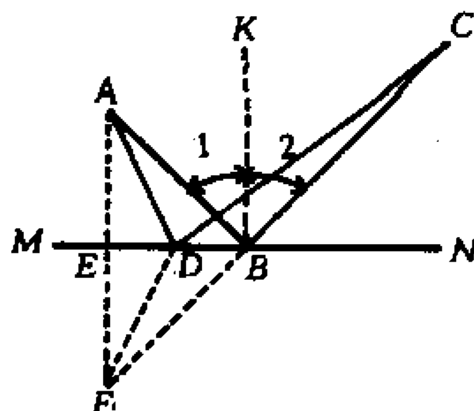


图93 光线经过反射以后，仍旧走最短的路径

根据光学的定律，反射角2等于入射角1。知道了这一点，就很容易证明从 *A* 点到镜面再到 *C* 点的所有可能走的路线里，*ABC* 是最短的一条。我们可以把光线的路径 *ABC* 跟另外一条路径比如 *ADC*(图93)来比较一下。从 *A* 点向 *MN* 作一垂线 *AE*，把它延长到跟 *CB* 线的延长线相交于 *F*。然后把 *F*、*D* 两点用直线连接起来。首先让我们证明三角形 *ABE* 和 *FBE* 全等。这两个三角形都是直角三角形，而且有公共的直角边 *EB*；此外，*EFB* 和 *EAB* 两角相等，因为它们分别跟角2和角1相等；这样



就证明了三角形 ABE 和三角形 FBE 全等。于是得到 $AB = FB$，$AE = FE$。现在再来看两个直角三角形 ADE 和 FDE，它们有公共的直角边 ED，上面又已经证明 $AE = FE$，所以三角形 ADE 和三角形 FDE 也全等。因此，AD 和 FD 也自然相等。

这样一来，我们可以把路线 ABC 用跟它相等的路线 FBC 来代替(因为 $AB = FB$)，把路线 ADC 用路线 FDC 来代替。把这两条路线 FBC 跟 FDC 比较，可见直线 FBC 要比折线 FDC 短。因此，路线 ABC 要比 ADC 短，而这正是我们需要证明的！

无论 D 点在什么地方，只要反射角等于入射角，路线 ABC 总比路线 ADC 短。这样，光线在光源、镜子和人的眼睛之间行进，果然是选择所有可能的路线里最短的一条。这一点，还在2世纪时就由希腊亚历山大城的机械师和数学家希罗指出了。

乌鸦的飞行路线

学会了在上述一类情况下选择最短的路线，你就可以用来解答一些要动脑筋的问题。下面是这类题目里的一个。

在一株树上歇着一只乌鸦，地上撒着许多谷粒。乌鸦从树上飞到地上，衔了一粒谷粒，飞到对面的栅栏上。问：乌鸦应当在什么地方衔取谷粒，才能够使它飞最短的路(图94)？



图94　乌鸦的题目
请找出它飞到栅栏的最短路线

这个题目跟方才那一个完全相像。因此不难立

刻得出正确的答案来：这只乌鸦应当模仿光线，也就是说，它应当使角 1 等于角 2(图 95)。我们前面已经看到，这样的路线是最短的。

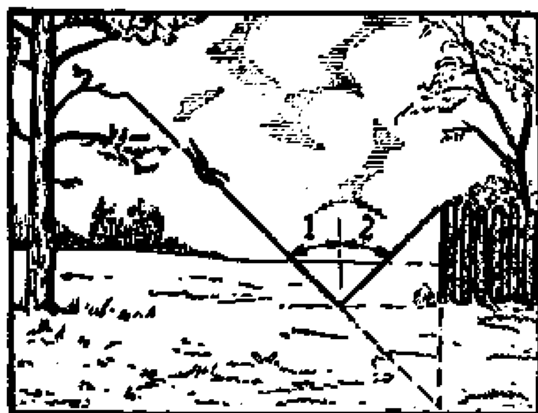


图 95　乌鸦的题目的答案

关于万花镜的新旧材料

大家都知道有一种玩具，叫做万花镜(图 96)，这东西里面的一些各种形状的碎片，经过几块平面镜反射以后，会形成美丽的图案；而且，只要把万花镜略一转动，就会有各种不同的图案出现。万花镜虽然这样普通，但是还很少有人知道，一只万花镜究竟能够变出多少种图案来。假定你手里有一只万花镜，里面有 20 块玻璃碎片，你每分钟把这万花镜转动 10 次。要把这只万花镜里的一切花样全部看完，需要多少时间呢？



图 96　万花镜

对于这个问题，即使是想象力最丰富的人也不可能猜到它的正确答案。为了使躲藏在这只小玩意儿里的一切变化全部变化完毕，恐怕要等到海枯石烂了。

万花镜的无穷尽的各种各样的变化，早就引起了装饰艺术家的注意。这些艺术家虽然有丰富的想象能力，但跟万花镜无穷尽的发明天才来比，还是差得很远。万花镜可



以立刻就创造出惊人美观的图案，可以给糊墙纸或织造品提供很好的新图样。

在今天，万花镜这玩意儿，大概已经不再在群众中间引起很大的兴趣了，但是在100多年前，当它还是一个新鲜玩意儿的时候，却引起了广大群众对它的爱好。人们纷纷用散文或诗句来颂扬它。

在俄国，万花镜最初出现的时候，就曾经受到赞赏和欢迎。寓言作家伊兹迈依洛夫在1818年7月出版的《善意者》杂志上有一篇文章，就是讲到万花镜的，他说：

我看到了关于万花镜的广告，就想法弄到了这个奇妙的玩意儿——

我向里面望去——是什么呈现在我眼前？
在各种花样和星形的图案里面，
我看到了青玉、红玉和黄玉，
还有金刚钻，还有绿柱玉，
也有紫水晶，也有玛瑙，
也有珍珠——一下子我都看到！
我只用手转一个方向，
眼前又是新的花样！

其实，不但是诗，就是用散文，也不可能把你在万花镜里所看到的美景都描写出来。万花镜里的图案，只要你手动一下，就立刻会变换，而且各不相同。是多么美丽的图案呀！假如能够把它们绣到布上，该多么好呀！但是往哪儿找这么鲜艳的丝线呢？这真是消遣的好事情，看万花镜真要比做无聊的游戏好多了。

据说万花镜在17世纪就已经发明了。不久之前它重新盛行起来，而且经过改进。一位法国富人花了2

万法郎订制了一只万花镜。他叫匠人把最贵重的宝石放到万花镜里去。

接着这位寓言作家讲了一个关于万花镜的有趣的笑话，最后他用了一种在当时落后的农奴时代特有的忧郁语调，结束了他的文章：

制造优等光学仪器出名的皇家物理学家和机械师罗斯披尼造出的万花镜每只要20卢布。无疑地，喜欢这玩意儿的人要比喜欢他的理化讲座的人更多，遗憾和奇怪的是，这位好心肠的罗斯披尼先生竟没有从他的理化讲座上得到过什么好处。

万花镜在很长一段时期里只是被当做一种有趣的玩具。只有在今天，它才给用来画制图案。不久以前发明了一种仪器，可以用来拍出万花镜图案的照片，于是人们就可以利用机械想出各种可能的花样了。

迷宫和幻宫

假如你变成了万花镜里的小玻璃块，那时候你会有些什么样的感觉?这是可以用实验的方法来让你体验的。1900年在巴黎举行的世界博览会上，观众就曾经有过这个机会——博览会上有一座所谓的“迷宫”，实际上就是一只大万花镜，只是不会动罢了。这是一间六角大厅，大厅的每面墙壁都装着一面极端光洁的大镜子，大厅的各个角上都装着柱子，墙上有檐板跟天花板相连。观众走进这座大厅里，就会觉得自己是在不知道多少



间大厅和柱子中间的不知道多少个跟自己一模一样的人群里；这些大厅和人从四面八方包围着他，一直伸展到他目力看不清的地方。

图 97 上画着横线的那 6 个大厅，是原来大厅经过一次反射以后所产生的像。在第二次反射以后，就又产生了 12 个大厅，得到的像画着竖线。第三次反射的结果，又添了 18 个大厅(画着斜线)。每反射一次，大厅的数目也就跟着增加。它的总数要看镜子磨光的光洁程度和两面相对的镜子平行的准确程度来决定。一般说，大厅的第 12 次反射还可以辨别得出，这就是说，在大厅里能够看到 468 个大厅。

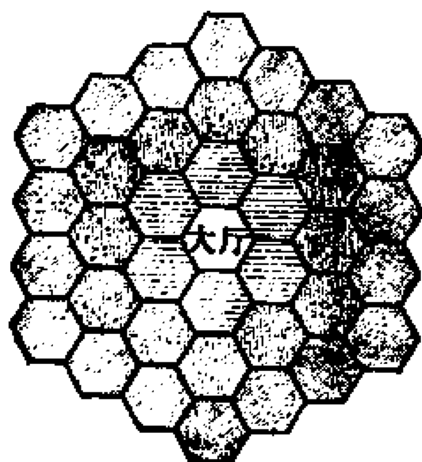


图 97 中央大厅的墙壁上3次反射以后，就有了36个大厅

造成这种景象的原因，凡是懂得光的反射的人，一定都会明白：这座大厅里有平行的镜子 3 对和不平行的镜子 12 对，因此，它们可以有这许多次反射，是一点也不奇怪的。

巴黎博览会上还有一座所谓“幻宫”，在这里面可以看到更奇妙的光学现象。这座“宫”的设计人除了设计出多次反射以外，还使它能够在瞬息之间改变全部景象。他们仿佛造出了一只活动的大万花镜，把参观的人装在里面。

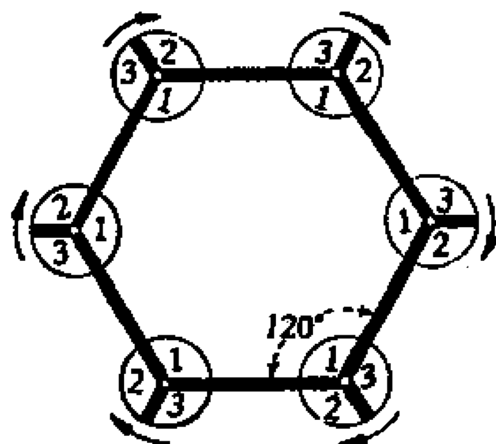


图 98 “幻宫”构造的简图

这座“宫”里景象的变换是这样的：每块镜子做的墙壁在离墙角不远的地方竖直割裂，这样得到的墙角能够绕着柱子里的轴旋转。图 98 上可以



图 99 “幻宫”的秘密

看到，可以用 1、2、3 三个墙角变出三种变化来。假定角 1 夹着热带森林的布景，角 2 夹着阿拉伯式大厅的装饰，角 3 夹着印度庙宇的装饰(图 99)。那么，只要转动墙角的机关动了一下，大厅里热带森林的景象就突然变成印度的庙宇或者阿拉伯式的大厅了。原来，这里全部的秘密就只是根据光线的反射这么个简单的物理现象而设计的。

光为什么会折射和怎样折射

光从一种介质进入到另外一种介质的时候，它的路线曲折，这一点有许多人认为是大自然在耍脾气。真的，光在进入新的介质以后，为什么不保持原来的方向前进，却选择了曲折的路径呢?关于这件事情，如果用军队在容易走和不容易走的地面交界的地方行进的情形来作比喻，就会完全明白了。下面是 19 世纪的天文学家和物理学家赫歇耳关于这个问题所说的话：

请设想有一队兵士正在行进，那里的地面有一段是平坦容易走的，有一段是高低不平不容易走、走起来就不可能太快的。两段地面的分界线，恰好是一条直线。现在，再设想这队兵士的队伍正面跟这条分界线成某一个角度，因此同一横排的兵士到达这条直线



不会在同一时间，而是有迟早的不同。每个兵士一跨过分界线走上不平的地带，就不可能走得像以前那么快，因此，也就不可能再跟那些还没有跨过分界线的同一排兵士保持在一条直线上前进，而是慢慢地落后了。这时候假如兵士不走乱队伍，仍旧依着队形前进，那跨过了分界线的部分不可避免地要落到其余部分的后面，因此在跟分界线相交的点上曲折成一个钝角。又因为每个兵士一定要合着节拍踏着步子前进，也不能够抢先，每个兵士就自然会依着跟新的队伍的正面成直角的方向前进，因此每个兵士越过分界线以后所走的路径：第一，会跟新的队伍正面相垂直；第二，路程的长短和在平坦地面上在同一时间里面能够走的路程长短的比，恰好跟新的行进速度和旧的行进速度的比相等。

我们不难应用手头现成的东西在桌子上做一个小实验。把桌面的一半用台布盖好(图 100)，然后，使桌子略略倾斜，把一对装牢在一根轴上的小轮子(例如可以从损坏了的玩具汽车上拆下来)放在高的一头让它滚下去。假如轮子滚动的方向跟台布的边恰好成直角的话，那么它滚动的路径是不会发生曲折的。这表示了光学里的一条定律，就是垂直射向不同介质分界面的光线，是不发生曲折的。但是，如果轮子的滚动方向跟台布的边缘成某一个角度的偏斜，轮子滚动的路径就要在这个边缘上发生曲折，也就是说在行进速度不同的介质的边缘上发生曲折。这里我们不难发现，当轮子从滚动速度比较大的那一

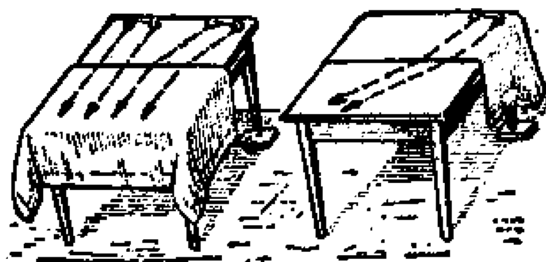


图 100　解释光的折射的实验



部分桌面(没有桌布的部分)滚到滚动速度比较小的那一部分桌面(有桌布的部分)的时候，它的路径的方向是折近界线的垂线或者所谓“法线”的。在相反的情形下，就会折离这法线。

从这里我们可以顺便提出重要的一点，就是光的折射是光在两种介质里的行进速度不同这一个基础上产生的。这速度的差别越大，那么折射的程度也越大；表示光的折射程度的所谓“折射率”，就是这两个速度的比值。你知道光从空气进入水里的折射率是4/3，那你同时就可以知道光在空气里行进的速度约等于在水里的1.3倍。

这里还可以看到光的传播的另一个特性。如果说光线反射的时候是依最短的路径行进的，那么在折射的时候是取最快的路径的：除了这一条折射路线之外，没有一个别的方向可能使光线这么快到达它的“目的地”的。

什么时候走长的路比短的路更快

那么，难道说走曲折的路径比走直线能够更快地到达目的地吗？是的，如果全程各段的行进速度不一样，那情形的确是这样。

举例来说，假定有一个人住在两个火车站之间，而离一个火车站很近。他想尽快走到比较远的那个车站上去，他会骑马向反方向走到比较近的车站，在那里搭上火车到他的目的地去。从他的村庄到他的目的地，如果一直骑马前去，走的路会近一些，但是他宁愿骑马搭火车走一段比较长的路，原因是这样走会比较快到达目的地。在这里，走长的路就比走短的路更快。

现在不妨再花一分钟时间看一看另外一个例子。一位骑马



的通讯员，要从 A 点把一份报告送到 C 点的司令官那里(图101)。在他和司令官帐幕之间隔着一片沙地和一片大草地，沙地和草地的分界线是一条直线 EF。马在沙地里走是很困难的，这儿的速度只等于在草地上速度的一半。问：为了尽快把报告送到，这位骑马的通讯员应该选择怎么样的路线？

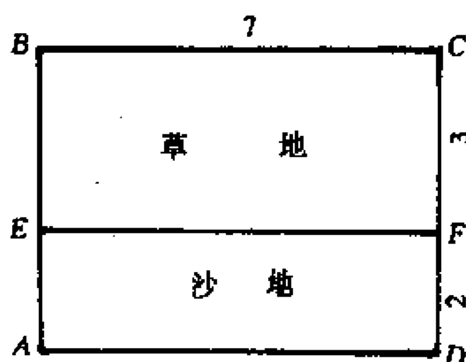


图 101　通讯员的题目：求从 A 到 C 的最快到达的路径

初看，最快的路径自然应当是从 A 到 C 的直线。但这是完全错误的，而且我也不相信会有走这条路径的通讯员。沙地上难走他是明白的，这使他正确地考虑到难走的沙路应该越短越好，就是越过这沙地的路线应该越斜得少越好；当然，这样做会加长了越过草地上的路；但马在草地上可以走得比较快，速度等于沙地的 2 倍，因此路长一些也还是有利的，可以使得全程在较短时间里走完。换句话说，他走的路线应该在沙地和草地的分界线上折曲，使草地上所走的路线跟分界线的垂线所成的角，比沙地上所走的路线跟这垂线所成的角大。

懂几何学的人，可以用勾股弦定理算出直线 AC 果然不是最快的路线，如果照我们这里图上所画的尺寸来说，假定我们沿 AEC 折线行进的话(图 102)，可以更快到达目的地。

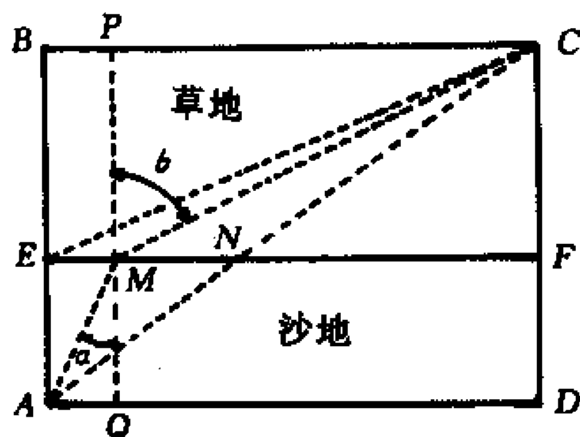


图 102　通讯员题目的答案：最快的路径是 AMC

图 101 上注明，沙地阔 2 公里，草地宽 3 公里，BC 长 7 公里。于是按照勾股弦定理，AC 的

全长(图 102)就是

$$\sqrt{5^2+7^2}=\sqrt{74}=8.60\text{公里}$$

里面 *AN* 部分是沙地上所走的路，这段路很容易看出是等于全长的 2/5，就是等于 3.44 公里。由于沙地上行进速度只等于草地上的一半，3.44 公里的沙路就得用去在草地上走 6.88 公里的时间。因此，走完全长 8.60 公里的 *AC* 直线的路程所要花的时间，等于在草地上走 12.04 公里所花的时间。

现在我们给折线路程 AEC 也来做一次同样的计算。折线的 *AE* 部分是 2 公里，所花的时间等于在草地上走 4 公里的时间；*EC* 部分呢，$EC=\sqrt{3^2+7^2}=\sqrt{58}=7.61$ 公里。总加起来，走完 *AEC* 折线，所花的时间相当于在草地上走 $4+7.61=11.61$ 公里。

照这样说，看起来比较“短”的直路，实际上相当于在草地上走 12.04 公里，而比较“长”的折线路却一共相当于在草地上走 11.61 公里。你看，比较“长”的路竟要比那比较“短”的路近 $12.04-11.61=0.43$ 公里，就是大约近半公里！我们这里还没有指出最快的路线。理论告诉我们，最快的路线应该是(这儿得找三角学来帮忙了)使 b 角的正弦跟 a 角的正弦间的比 ($\sin b:\sin a$)等于草地上速度跟沙地上速度间的比，就是 2:1。换句话说，要选最快的路线，一定要使 $\sin b$ 等于 $\sin a$ 的 2 倍。这样跨过分界线的 *M* 点，应该离 *E* 点 1 公里。

那时候

$$\sin b=\frac{6}{\sqrt{3^2+6^2}},\text{而}\sin a=\frac{1}{\sqrt{1^2+2^2}}$$

$\sin b$ 和 $\sin a$ 的比是：

$$\frac{\sin b}{\sin a}=\frac{6}{\sqrt{45}}:\frac{1}{\sqrt{5}}=\frac{6}{3\sqrt{5}}:\frac{1}{\sqrt{5}}=2:1$$

恰好等于两个速度的比。

那么，这全部路程换算为在草地上走的路程，等于多长呢？试演算一下：$AM=\sqrt{2^2+1^2}$，这相当于在草地上走 4.47 公里，



$MC=\sqrt{3^2+6^2}=6.70$ 公里。全程长 $4.47+6.70=11.17$ 公里，就是要比直线路程短 0.87 公里，因为我们已经知道那直线路程的长度是相当于草地上 12.04 公里的。

这儿你可以看见，在本题所说的条件下，按曲折路线走是比依直线走更有利的。光线就正是选择了这样的捷径，因为光的折射定律就完全适合于解答这个题目的一切数学上的要求的：折射角的正弦跟入射角正弦的比(图 103)，恰好等于光在新的介质里的速度跟它在原来的介质里的速度的比；从另一方面来说，这个比值就是光在这两种介质间的折射率。

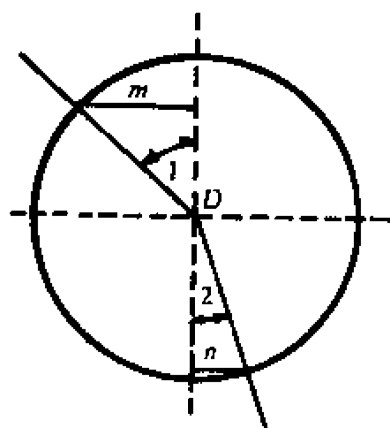


图 103　什么叫做“正弦”?线段 m 和半径的比就是∠1的正弦;线段 n 和半径的比就是∠2 的正弦

把光的反射和折射的定律结合到一起，我们就可以说光线在不管什么情形下都是依最快的路径行进的，这在物理学上就叫“最快到达的原理”(费马原理)。

假如介质不是均匀的，它的折射能力是逐渐改变的，例如在大气里——在这种情形下，仍旧是合于最快到达的原理的。这可以解释从天体来的光线在大气里稍微折射的现象，天文学家叫这种折射为“大气折射”。大气的密度是从上向下层逐渐加大的，在这样的大气里，光线的折射路线是凹向地面的，这样光线在上层空气里走的时间比较久，因为在那里它可以走得更快些，而在不容易走快的下层里走的时间比较短；结果它就会比沿直线路径更快地到达目的地。

最快到达的原理(费马原理)不只对光的现象适用，对于声的传播以及一切波动也完全适用，不管波动是属于哪一种类的。

读者一定很想知道，波动的这种特性是怎样解释的。这种特性在最近的物理学理论上起了很大的作用。因此我把现代物

理学家薛定谔对于这一点的解释[1]介绍在下面。

从方才谈的兵士行进的例子出发，而且假定光线是在密度逐渐改变的介质里行进，现代物理学家说：

> 假定兵士都握着一根长杆子，使得队伍的正面能够保持整齐。现在司令员下令用全速跑步前进。假如地面的情形是逐渐改变的，比方说，起初队伍的右翼移动得比较快，以后左翼才跟了上去——这样队伍的正面就自然而然会转了过去。这里我们就可以看出，他们所走的路径就不是直线而是曲折了的。至于这条路径在时间上应该是最快到达目的地这一点，那是很明显的，因为每个兵士都是用最大速度在跑的。

新鲁宾孙

儒勒·凡尔纳的一部小说《神秘岛》里，讲到几个主角在那荒无人烟的地方没有火柴和打火器是怎样取火的。我们知道鲁滨逊是靠闪电帮忙的，靠闪电燃着了一株树木。——《神秘岛》里的新鲁宾孙，却不是靠偶然的外界帮助来取火，而是靠那位博学的工程师的机智和他的物理学的渊博知识。

你如果看过这部小说，大概还记得那位天真的水手潘克洛夫打猎回来的时候看见工程师和那位通讯记者坐在熊熊的火堆前面的那种惊奇情形。

[1] 在斯德哥尔摩接受诺贝尔奖金时宣读的报告(1933年)。



“可是谁生的火呢？”水手问道。

“太阳。”史佩莱回答。

通讯记者并没有开玩笑。的确，使水手这样惊奇的火堆，竟是太阳生起来的。那水手惊奇得简直不能相信自己的眼睛，他惊讶得愣住了，甚至都没有想到问一声工程师。

“这么说，你大概带着放大镜吧？”水手终于向工程师问道。

“不，但是我做了一面。”

说着，他把这面放大镜指给水手看。这只是两块玻璃，是工程师从他自己和史佩莱的表上拿下来的表玻璃。他把两块玻璃对合起来，中间装满水，用泥土把接合缝粘好，——于是就得到一面地道的放大镜，工程师用它把太阳光聚在干燥的地苔上，就取得了火。

我想，读者一定很想知道，为什么一定要在两块玻璃中间装满水。难道这两块表玻璃中间如果是空气就不能把太阳光聚集起来吗？

不错，的确是不可能聚集的。表玻璃的内外两个表面是平行的，是两个同心球面；但是我们已经从物理学上知道，光线射过这种平行表面的介质，是几乎不会改变它的方向的。接着这光线射过了另一块同样的玻璃，这里它也同样地不会折射，因此，通过这两块玻璃以后，光线并不会聚集到焦点上。要想使光线聚集到一点，一定要用一种透明的又能够使光线曲折得比在空气里大的物质装在这两块玻璃之间。儒勒·凡尔纳小说里那位工程师就正是这样做的。

盛水的普通玻璃瓶，假如它是球形的，也可以用来取火。这件事情从前的人早就知道，他们并且注意到这时候瓶里的水仍旧是冷的。曾经发生过这样的事情，一只盛水的圆瓶放在打

开着的窗口上，竟燃着了窗帘和台布，并且烫坏了桌面。从前药房橱窗里时常用装有颜色水的很大的圆瓶做装饰，这种瓶有时候竟会引起极大的灾害，使得附近容易燃烧的药品燃烧起来。

一只小圆瓶装满了水，可以把太阳光聚集来烧沸表玻璃上所盛的水：这只要用直径 12 厘米的圆瓶就可以了。如果用直径 15 厘米的圆瓶，在焦点[1]那里可以得到 120 摄氏度的温度。用盛水的圆瓶来点香烟，就跟用玻璃透镜一样容易。关于用玻璃透镜来燃着烟草，罗蒙诺索夫就曾经在他的一篇《谈玻璃的用处》的诗里，有过这样的描写：

> 我们在这里用玻璃从太阳处取得了火焰，
> 愉快地学着普罗米修斯的样。
> 咒骂着那无稽谰言的卑劣，
> 用天火吸烟，哪里会有罪孽！

但是我们应该指出，这种水做成的透镜的取火作用是要比玻璃透镜弱得多的。这是因为，第一，光在水里的折射要比在玻璃里小得多，其次，水会吸收光线里极大部分的红外线，而红外线对于物体的加热是有重大作用的。因此我们可以用很简单的计算来证明，儒勒・凡尔纳那部小说里所提到的那个聪明的取火方法，其实是并不可靠的。

有趣的是，这种玻璃透镜的特性，古代的希腊人早就知道了，那还是在眼镜和望远镜发明以前的 1 000 多年哩。这件事情，希腊喜剧诗人亚理斯多芬(公元前 440 ～公元前 380）在著名的喜剧《云》里就曾经提到过。在那个喜剧里，索克拉特向斯特列普吉亚德提出了一个问题：如果有人写了一张债券，说你欠

---

〔1〕这里的焦点是离圆瓶极近的。



他5个塔兰特[1]，你要怎样去把它消灭呢?

斯：我想到一个消灭这张债券的方法了，而且是这么好的一个方法，你得承认它是再奇妙没有的了！你一定看见过药房里用来燃着东西的那种精致而透明的东西吧?

索：就是那个“取火玻璃”吗?

斯：正是。

索：那又怎么样呢?

斯：等公证人写的时候，我把这东西放到他身后，把太阳光射过去，把所有文字全给烧掉……

为了帮助读者了解，让我提醒大家，亚理斯多芬时代的希腊人是在涂蜡的木板上写字的，这种蜡碰到热就会熔化。

怎样用冰来取火

其实，就是冰块也可以用来做制造透镜的材料，因此也就可以用来取火，只要它相当透明就行。冰在折射光线的时候，本身并不烧热和融化，它的折射率只比水略低一些，因此，我们既然能够用盛水的圆瓶取火，也就一定可以用冰块透镜来取火。

冰制的透镜在儒勒·凡尔纳的《哈特拉斯船长历险记》那部小说里起过很大的作用。当这批旅行家失落了他们的打火器，在零下48摄氏度的极冷天得不到火的时候，克劳波尼博士正是用这个方法燃着火堆的。

---

〔1〕古币名。

“这简直太不幸了。”哈特拉斯向博士说。

“是的。”博士回答。

“我们连一个望远镜都没有，如果有望远镜，倒可以把透镜拿下来取火了。”

“是呀，”博士回答说，“可是真太遗憾了，我们竟没有这个东西；太阳光倒相当强烈，有了透镜是一定能够烧着火绒的。”

“怎么办呢，我们只好吃生的熊肉充饥了。”哈特拉斯说。

“是的，”博士沉思地说，“必要时只好这样。但是我们为什么不……”

“你想出了什么办法？”哈特拉斯好奇地问。

“我有了这么一个念头……”

“一个念头？”水手长叫了起来，“只要你一有了念头，我们就得救了！”

“但是不知道能不能成功。”博士犹疑不定地说。

“你到底想出了什么办法？”哈特拉斯问道。

“我们不是没有透镜吗？我们要把它造出来。”

“怎样造法？”水手长感兴趣地说。

“用冰块来造。”

“难道你真要……”

“为什么不呢？我们需要的不过是使太阳光聚集到一点，用冰块跟用最好的水晶一样有效。但是我要选用一块淡水的冰块，它比较坚实也比较透明。”

“如果我没有弄错，这块冰块，”水手长指着100步外的一块冰块说，“从它的颜色来看，应当恰好是你需要的那种。”

“你说得很对。请你带着斧头。走呀，朋友们。”





图 104 博士把太阳光聚集到火绒上

三个人一同向那块冰块走去。果然，那块冰块是淡水凝结成的。

博士下令砍下一大块冰来，这冰的直径大约有 30.5 厘米 (1 英尺)[1] 大小，他们先用斧头把它砍平，然后用小刀精修，最后用手把它磨光，这样果然成了一块透明的透镜，仿佛用最好的水晶做成的一般。太阳那时候还很明亮。博士拿着这块冰迎着阳光，把太阳光聚集到火绒上。几秒钟以后，火绒就燃着了。

儒勒·凡尔纳的这个故事并不完全是幻想的，用冰制的透镜来燃着木料的实验，最早还是在 1763 年在英国就做成功了，用的冰块透镜是极大的。从那时候起，人们做过许多次实验，都得到良好的成绩。当然，要用斧头、小刀和手(还是在零下 48 摄氏度的严寒天气！）想做出一块透明的冰块透镜是很困难的，——但是也可以用一个很简单的方法来做这种冰块透镜：把水加到有合适形状的碟子里(图 105)，让它结冰，然后把碟子略热一下，便可以把做好的透镜拿出来了。



图 105 做冰块透镜用的碟子

〔1〕1 英尺等于 0.305 米。

做这个实验的时候，不要忘记一定要在晴朗而严寒天气的露天里做，不要在房间里面隔着窗玻璃来做，因为玻璃会吸收太阳光里的大部分热能，留下来的热会不够引起燃烧的。

请太阳光来帮忙

请再做一个同样简单的、在冬天很容易做的实验。在有阳光照射的雪面上，放两块同样大小的布，——一块白色，一块黑色。过了一两小时去看，你会发现黑布已陷进雪里去了，但是白的一块仍旧留在雪面上。这个区别的解释很简单：黑布底下的雪要融化得快些，因为黑布吸收了射在它上面的太阳光的大部分热能；白的那一块呢，却刚刚相反，它把太阳光的大部分反射出去，因此，它所受到的热没有黑布那样多。

对于这个有意思的实验，美国的著名政治家、物理学家富兰克林有过下面一段描写：

> 我在缝工那里拿了几块各种颜色的方形的布片，有黑色的、暗蓝色的、鲜蓝色的、绿色的、紫色的、红色的、白色的以及许多别的颜色的。在一个有太阳的早晨，我把这些布片都放到雪上。几小时以后，受热最多的那块黑布深深地陷到雪里去，甚至陷到太阳光已经射不到的那样深；暗蓝色那块也陷到雪里，差不多跟黑色的相同；鲜蓝色的陷进的少得多；其余各块布片，颜色越鲜明的陷进得就越少。至于白色那一块，仍旧留在原来的雪面上，根本没有陷下去。

对于这件事情，富兰克林感叹着接下去说：

一个理论，假如不可能从它那里得到一些好处的话，那么这个理论还有什么意义呢？难道我们不能够从这个实验得出结论说，在热天穿黑色的衣服不如穿白色的合宜，因为黑衣服在日光底下会使我们的身体受到比较多的热，如果再加上我们自己的活动，也会生出热来，会使得我们身体觉得太热了，难怪男女在夏天戴的帽子应该用白颜色，以免太热了会引起中暑……还有，涂黑了的墙壁难道不能够在整个白天里吸收足够的太阳热，以便在夜里仍旧保持有某种程度的热量，保护水果不会冻坏吗？难道细心观察的人不能够发现别的多多少少有价值的小问题吗？

这些结论和应用有什么意义，可以从1903年“高斯”号轮船到南极去探险的实际例子里找到答案。这艘轮船冻结在冰里了，一切用来帮助它解脱这个困难处境的方法都没有用。人们用了炸药和锯子，但是也只能够打开几百立方米的冰，那船却仍旧不能够恢复自由。后来人们只好试一试请太阳光来帮忙：人们用黑灰和煤屑在冰面上铺了2公里长、10米宽的一大片，从轮船边上铺起，一直铺到冰的最近一条宽裂缝上。那时候正好是南极的夏天，连续许多天都是好天气，于是，太阳光竟做了炸药和锯子所做不到的工作：冰逐渐融化了，沿着那黑色的带子破裂开来，这艘轮船就此脱离了冰的羁绊。

关于海市蜃楼的新旧材料

大家一定都知道海市蜃楼这个现象的发生原因。在沙漠

里，沙地受到炎热太阳的晒炙，接近沙面的热空气层比上层空气的密度小，这就使它有了跟镜子一样的作用。从很远的物体射来的倾斜光线，在射到这些空气层之后，会把行进的路线曲折起来，使得它射到地面以后会再从地面折射向上，射到观察者的眼里，就好像用极大的入射角从镜面反射出来的情形一般。观察者因此就好像看到在他面前的沙漠里展开了一片水面，反映着岸边的景物(图 106)。

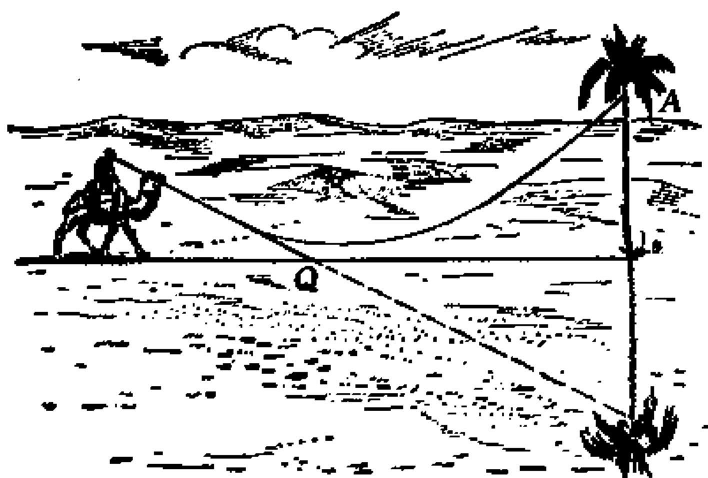


图 106　沙漠里的海市蜃楼是怎样造成的
这幅图是在教科书里时常采用的，但是它有点过分夸大，把光线的路径画得过分陡直了

说得更正确些，我们应该说靠近炎热沙面的热空气层反射光线的情形不是像镜子，而更像从水底望去的水面。在这里，产生的不是普通的反射，而是物理学上的“全反射”。要得到全反射，应该使光线极斜地射进这层空气层——要比图 106 所画的斜得多；否则入射角就不会超过“临界角”，不可能得到全反射。

顺便让我们提出这个理论里容易使人误会的一点：照方才所说的那个解释，密度比较大的空气层应该在密度比较小的空气层之上。但是我们同时知道，密度比较大的也就是比较重的空气总要向下落，把它底下密度比较小的空气挤到上面去。那



么，又怎么能够使密度比较大的空气层留在上面，而造成海市蜃楼的现象呢?

答案非常简单，我们要密度比较大的空气层在上面，虽然在稳定的空气里是不会有的，但是在流动的空气里却是可能的。被地面炙热的空气固然不会停留在地面上，它要不断地向上升起，但是立刻就有一层空气来补空，这一层空气接着也受到炙热，就又变成了热空气。这样不断地替换着，在炙热的沙面上就总会有一层密度比较小的空气层，——虽然不老是那一层，但是这对于光线的行进是无所谓的。

我们方才谈的这种海市蜃楼，人们很早就已经知道了。这种海市蜃楼在现代的气象学上叫做“下现蜃景”(另外还有“上现蜃景”是由上层空气稀薄发生反射作用造成的)。许多人认为这种古人早已知道的海市蜃楼只能够在南方沙漠里的炎热空气里出现，在北方是绝对不会有的。但是事实上“下现蜃景”也时常会在我们这里发现。这种现象特别在夏天的柏油马路上时常有发现，因为这些路面的颜色比较深，所以受到太阳光的强烈炙热。这样一来，粗糙的路面看过去竟会像淋过水般的光滑，会反映出很远的物体。这种“海市蜃楼”的光线行进路径像图 107 所示。只要你能够留心些，这种现象是时常可以看到的，并不像你想象的那样难得。



图 107　柏油马路上的海市蜃楼

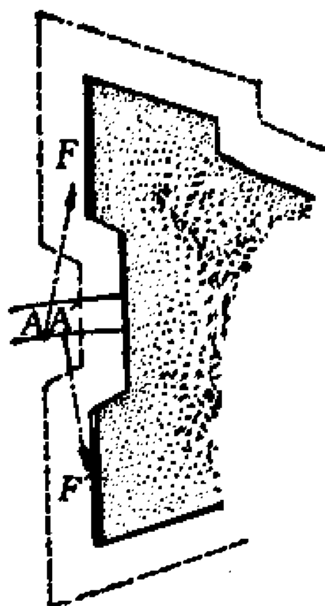


图 108　发现海市蜃楼的堡垒墙壁平面图
从 A 点看墙壁 F 就像一面镜子，从 A' 点看墙壁 F' 也像一面镜子

还有一种是侧面的海市蜃楼就叫做“侧现蜃景”，这种海市蜃楼的存在，一般人恐怕连想都没有想到。其实这就是竖直的墙壁被炙热以后的反射现象。这个现象曾经有一位作家写出来过。这位作家在走近一个炮台堡垒的时候，发现堡垒的混凝土墙壁突然亮了起来，跟镜子一样反映出四周的景物、地面和天空。再走了几步，他又在堡垒的另外一堵墙壁上发现了同样情形，就仿佛那灰色不平的墙壁突然变成十分光滑似的。原来，那一天天气非常热墙壁给炙得滚烫——这就是这个谜的解答。图 108 表示堡垒两堵墙壁（F 和 F'）的位置和观察者的位置（A 和 A'）。原来，墙壁给太阳炙得相当热也会使你看到海市蜃楼的。这个现象并且能够用照相机拍摄出来。

图 109 表示堡垒的墙壁 F 起先是粗糙不平的（左），后来亮了起来（右），就像镜子一样（这是从 A 点拍摄的）。左面的照片

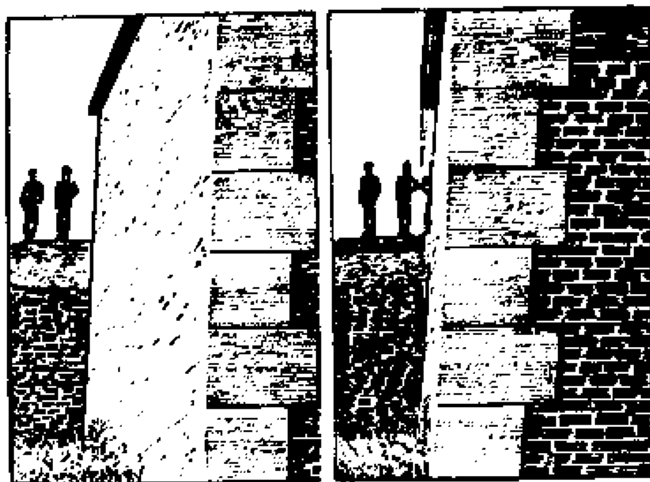


图 109　灰色粗糙的墙壁（左）仿佛突然变成光滑而能反射的了（右）



上是一堵普通的灰色混凝土墙壁，那里自然没有反射现象发生，不可能把附近的两个人形反映出来。右面那幅照片呢，表示的仍旧是方才那堵墙壁，只是它的大部分已经起了镜面的作用，因此立得比较近的那一个人在墙壁上就被反映出他的像来了。当然，反射光线的并不是墙壁本身，而只是贴近它的炙热的空气层。

在夏天极热的日子，你不妨时常去留意大建筑物的被炙得很热的墙壁，看看有没有这种海市蜃楼发生。无疑的，如果经常这样留心去观察，发现这种海市蜃楼的机会一定会有很多。

“绿　光”

你曾在海面上观察过日落吗?无疑的，你一定观察过。那么，你可曾一直观察到太阳的上缘跟水平面相平，然后完全消失为止呢?我想你也一定观察过的。可是，假如你观察的时候，万里无云，天空完全明朗，你可曾发现当太阳投出最后一道光线的那一瞬间所发生的现象吗?恐怕就不一定了。但是我劝你不要失去机会去进行这样的观察：在那一瞬间，投进你眼帘的，不会是红色的光线，而是绿色的，鲜艳的绿色的光线，这个颜色的漂亮，甚至于随便哪一个画家也不可能在他的调色板上调出，就是大自然自己也不可能在别的地方像最清澈的海水里调出这样漂亮的颜色。

一份英国报纸上刊出的这节短文，引起了儒勒·凡尔纳写的《绿光》那部小说里的年轻女主角的极大兴致，她开始到处旅行，目的只有一个——亲眼看到这种绿光。根据小说家的叙

述，这位年轻的苏格兰女旅行家并没有达到她的目的，没有看到大自然的这个美景。但是这个现象却确实是有的。关于绿光，虽然常常带着许多传说般的说法，但是这个现象的本身倒并不是一个传说。每一位爱好大自然的人，只要他有耐心去寻找，能够看到这个现象，就一定会称赞这个景色的美丽的。

为什么会有绿光出现呢?

对于这个问题，只要你想起当我们通过三棱镜看物体时候所看到的情形，你就会明白了。请你先做一个实验：拿一个三棱镜平放在眼前，底面朝下，然后通过它去观察钉在墙壁上的一张白纸。你就会发现，首先是这张纸显然比原来的位置升高了，其次，纸的上面一边会显出紫色，下面一边却显出黄红色。纸升高是由于光线曲折的作用，纸边有颜色是由于玻璃的色散作用，就是因为玻璃对于不同颜色的光线有不同的折射率。紫色和蓝色的光线要比别种颜色的光线折射得更厉害，因此我们在纸的上面一边看到了紫蓝色；红色的光线折射得最差，因此在纸的下面一边看到了红色。

为了使下面的解释容易明白，在这个颜色边的问题上我们还得多说几句。三棱镜把从白纸反射过来的白光分散成光谱上所有的颜色，造成了那张纸的许多有颜色的像依颜色折射率大小的次序排列在一起，而且互相重叠。在所有颜色都重叠在一起的中间部分，我们的眼睛看过去是白色的(光谱颜色的总和)，但是上下边却露出没有别的颜色重叠上去的单纯的颜色。著名的诗人歌德也曾经做过这个实验，他可没有明白它的道理，认为他已经发现牛顿关于颜色的理论不正确，就写了一篇《论颜色的科学》，这篇文字几乎全部建立在颠倒是非的说法上。我想我们的读者一定不会重蹈歌德的覆辙，并且不会希望棱镜会增添物体的颜色。

地面大气对于我们的眼睛就仿佛是一个底面朝下的很大的三棱镜。我们望见已经落到地平线上的太阳，就是通过这个空



气三棱镜在观察的。因此太阳圆面的上面边缘就显出蓝绿色，下面边缘却显出黄红色。当太阳的位置还高出地平线的时候，因为圆面中央的耀眼的光线压倒了边缘的光度比较弱的各种颜色的光线，因此我们根本看不到这种颜色；但是在日出日落的时候，那时整个太阳圆面都隐藏在地平线以下，因此我们能够看到上面边缘的蓝色。这个边缘实际上是两重颜色的，上面是一条蓝色带，下面是蓝绿两种光线混合成的天蓝色。因此，假如接近地平线的空气完全洁净透明的话，我们就能够看见那蓝色的边缘——“蓝光”。但是这蓝光时常会给大气散射了，就只剩下一道绿色的边缘，这就是“绿光”现象。不过，因为地面上的大气在大部分的情形下是浑浊不清的，那时候会把蓝绿两种光线全部散射了，那我们就不可能发现什么颜色的边缘，而太阳也就像一个火红色圆球般落下山去了。

普尔柯夫天文台的天文学家季霍夫曾经做过一次“绿光”的专门研究，他告诉我们可以看见这个现象的许多征兆。“太阳下山的时候如果有红颜色，而且用普通肉眼去望也不觉得刺眼，就可以肯定地说，绿光是不可能看见的。”这理由是很清楚的：太阳的红颜色表示在大气作用下蓝绿光线的散失，也就是表示太阳圆面上部边缘的颜色完全散失。这位天文学家继续说道：“反过来说，假如太阳在下山的时候并没有显著改变它原来的黄白色，而且非常刺眼，那就可以有相当把握地希望绿光的出现。但这儿还得有一个条件，就是，地平线看过去一定要十分清楚，没有什么不平的地方，附近没有树林、建筑物等等。这些条件只有在海洋上容易得到；所以海员对绿光往往很熟悉。”

这样看来，如果想看到太阳的“绿光”，一定要在天空非常洁净的时候观察日出或日落。南方的国家，地平线上的天空比较清澈，因此“绿光”现象在南方也就可以有比较多的被观察机会。但是，“绿光”现象在我们这里，也并不像一般人受了儒

勒·凡尔纳的影响以后所想象的那样难得看到。只要你坚持有恒地去寻求，迟早一定会看到的。甚至有人用望远镜也望到过这美丽的现象。两位阿尔萨斯的天文学家对于这种观察有过这样的记述：

> ……在太阳完全落下去的前一分钟，当太阳的很大一部分还可以看得见的时候，那轮轮廓显明的、在波浪似地动着的太阳圆面，围上了一圈绿色的镶边。这个绿色镶边在太阳还没有完全落下之前，肉眼是不可能望见的。只有当太阳完全消失在地平线以下，才能够看得到。假如我们用相当高倍数(大约100倍)的望远镜望去，就可以清楚地看到这一切现象：这绿色的镶边最迟在日落前10分钟就可以望见；它围着太阳圆面的上部，但同时在圆面的下部却可以望到一道红色的镶边。这道绿色镶边起初很窄(视角一共只有几秒)，以后太阳逐步低落，镶边就逐渐加宽，有时候会增加到视角有半分之多。在这绿色的镶边之上，时常会看到的也是绿色的凸出部分，这些凸出部分随着太阳的逐渐消失，仿佛沿着它的边缘滑到最高点；有时候它们甚至脱离了镶边，继续发光几秒钟以后才熄灭。

“绿光”现象一般只延续一两秒钟。但是在特殊情形下，这个延续时间可以显著地加长。譬如说，有人曾看到过5分钟以上的“绿光”。太阳在很远的山后落下，一位快步行进的人看到了太阳圆面上的绿色镶边仿佛沿着山坡滑落(图110)。

在日出的时候，当太阳的上边缘开始从地平线下面露出的时候，观察“绿光”也是很有意思的事情。这个事实可以证明许多人的一种论断不正确，他们一向认为“绿光”只是眼睛受到日落以前太阳光芒的刺激所发生的光学上的错觉。

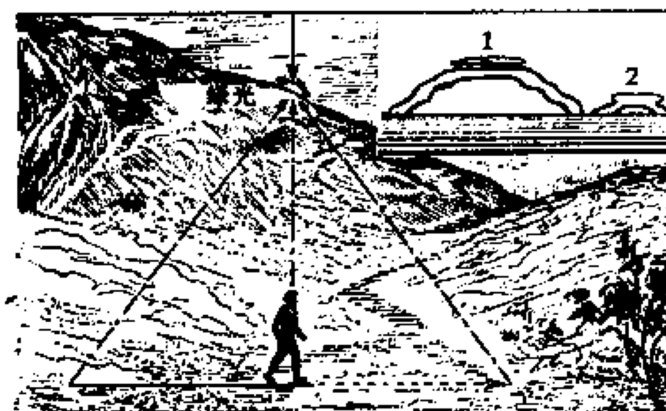


图 110　“绿光”的长时间观察：观察者在山后面能在 5 分钟内始终望见“绿光”。右上角是通过望远镜望到的“绿光”。注意太阳有不规则的轮廓。在 1 的位置太阳光很刺眼，妨碍肉眼观察，没法望见“绿光”。在 2 的位置太阳圆面几乎整个消失了，肉眼已经可以看到“绿光”了。

太阳并不是惟一能够发“绿光”的天体。有人发现金星在落下时会发出绿光的现象。



9 一只眼睛和两只眼睛的视觉

在没有照相术的时候

照相，在我们的日常生活里早已成了一件最平常的事情，因此，我们根本没法想象我们的祖先，即使是离开我们并不久的祖先，是怎样在没有照相术的条件下生活的。狄更斯在《匹克威克外传》里写了一个故事，说100年前英国某一个国家机关在画一个人的容貌时候的滑稽情形。事情发生在匹克威克被送进的那所债务监狱里。

> 通知匹克威克先生说，他要留在这里，等着懂得这种窍门的人们所谓“坐着让人画像”的仪式完成。
>
> “坐着让人画我的画像！”匹克威克先生说。
>
> “把你的肖像画下来啊，先生，”胖狱卒说，“我们这里都是画像的能手，这一点你应该早就知道。不一会儿就画好的，而且都很像。请进来吧，先生，不要拘束。”
>
> 匹克威克先生同意了这个邀请，坐下来；那时候站在椅子背后的山姆[1]对他耳语说，所谓坐着画像，在这里应当了解它的含义：
>
> “这是说，先生，那狱卒要仔细察看你的面貌，以便把你跟别的犯人辨别清楚。”
>
> 好戏开场了。那个肥胖的狱卒随意望了望匹克威克先生。另外一个狱卒坐到这个新来的犯人面前，全神贯注地注视着。第三个狱卒还一直跑到匹克威克的

[1] 山姆是匹克威克的仆人。



鼻尖前面，聚精会神地一一研究匹克威克的特征。

最后，肖像画好了，匹克威克先生接到通知说，现在他可以进监狱了。

更早以前，这种“像”是用各部分特征的“清单”代替的。你记得普希金的《波里斯·戈都诺夫》里，在沙皇的命令里提到葛里戈里，说“他身材矮小，胸脯宽阔，两手略有长短，蓝眼红发，颊额各有一痣”。现在呢，只要附一张照片，就一切都解决了。

很多人还不知道应该怎样看照片

照相术还在 19 世纪 40 年代就渗进我们的生活里来了，虽然当时还只是用金属板来拍摄的(所谓银板照相法)。这种拍照方法的最大缺点在于被拍的人一定要长时间坐在照相机前面——往往要坐上几十分钟……

而群众对于可以不要画家就能够得到自己相片这一点，也认为过分新奇，而且近于奇迹，因此并没有很快就相信。在一本古老的俄国杂志(1845 年)上，对这个问题有一段极有趣的记述：

许多人到现在还不肯相信银板照相法果真能够拍出照片来。有一次，一位衣冠楚楚的人跑去拍照，店主人[1]请他坐下来，校正了玻璃，装好一块板，看了看钟，就走开了。店主人在室内的时候，这位想拍照的人一动不动地端坐在那里；但是，店主人刚一走出房门，

[1] 就是摄影师。

这位客人为了急于看到自己的照片，认为没有继续端坐的必要，就站了起来，嗅了嗅鼻烟，仔细看了看照相机的四面，把眼睛凑近到玻璃上，然后摇了摇头，说了声“这玩意儿真怪”，就在室内来回地踱起方步来。

店主人回来了，他吃惊地停在门旁边，喊了起来：

“你怎么啦？我对你说过，要端坐在那里啊！”

“是呀，我是坐着呀。我只是在你出去之后才站起来的。”

“那时候你还是应该坐在那里的呀。”

“咦，我为什么要无缘无故地坐在那里呢？”

读者一定以为我们现在对于照相已经不会有这样幼稚的看法了。其实，即使在今天，许多人对照相还并没有多少了解，譬如说，就很少有人知道拍好的照片应该怎样看。你一定以为这根本没有什么怎样看的问题：把照片拿在手上看就是了。但是事实上并不这么简单。照片跟许多日常接触的东西一样，虽然接触很多，但是我们却不知道正确对待它。大多数的摄影师和爱好摄影的人——更不用提一般群众——在看照片的时候，完全不是用正确的方法看的。知道照相术已经将近100年了，竟还有不少的人不知道应该怎样看他的照片。

看照片的艺术

照相机在构造上说，等于一只大眼睛：在它的毛玻璃上显出的像的大小，要根据透镜跟被拍物体之间的距离来决定。照相机拍下来的底片上的像，就跟我们用一只眼睛（注意：一只眼睛！）放在镜头的位置上所看到的相同。因此，假如我们想从



照片上得到跟原物完全相同的视觉上的印象，我们就应该：

1. 只用一只眼睛来看照片，

2. 把照片放在眼前的适当距离上。

如果我们用两只眼睛看照片，我们一定会看到前面只是一幅平面的图画，而不是有远近不同的图画。这一点是不难理解的。因为这是根据我们视觉的特性看到的现象。我们看一个立体的东西，两眼视网膜上所得到的像是不相同的，右眼看到的跟左眼看到的并不完全一样(图 111)；正是这个不完全一样的像，才使我们能够感觉到东西是立体的而不是平面的，在我们的意识里会把这两个不同的像融合成一个凸起的形象(大家知道，实体镜就是根据这个道理造成的)。假如在我们面前只是一个平面的东西，譬如一堵墙壁，那时候情形就完全不同，那时候两只眼睛会看到完全相同的像，这样我们的意识里就知道它是平面的。

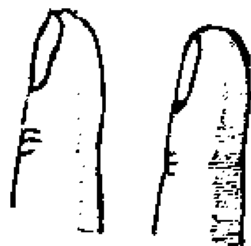


图 111　把手指放在眼前很近的地方，左右两眼所看到的情形

现在我们就可以明白，假如我们用两只眼睛来看照片是犯了什么样的错误，这样做就等于我们要自己感觉到前面是一幅平面的图画！我们把应该只给一只眼睛看的照片交给两只眼睛看，就妨碍了自己看到照片上应该看到的东西，因此，照相机这么完善地照出来的像，就给这个大意的行动完全破坏了。

应该把照片放在多远的地方看

第二条规则也同样重要，——应该把照片放在眼前的适当距离上来看，否则，也要破坏正确的形象。

这个距离究竟应该多大呢？

如果要得到一个完全的印象，照片所夹的视角应该跟照相机的镜头望到毛玻璃上的像所夹的视角一样，或者也可以这样说，应该跟照相机的镜头望到被拍的东西的视角一样(图 112)。从这里可以找到应该把照片放在多远来看的答案：这个距离和

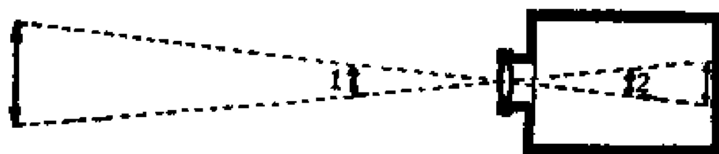


图 112　照相机里角 1 等于角 2

原物离开镜头的距离的比，应该跟照片上的像和物的长短的比相等。换句话说，我们应该把照片放在眼前大约等于镜头焦距的距离上。

假如我们注意到大多数小照相机的镜头焦距多是 12 ～ 15 厘米，那我们就可以知道，我们向来没有把照片放在正确的距离上来看：对于正常的眼睛，看东西最清楚的距离——明视距离——大约是 25 厘米，这个数目几乎等于照相机镜头焦距的 2 倍。至于挂在墙壁上的照片，因为人们都是从更远的距离上来看的，自然也只给人一种平面的感觉了。

只有患近视的人(以及能够在近距离看得清楚的孩子们)，他们的明视距离比较短，在用正确的方法(用一只眼睛)看一张普通照片的时候，才会看到这种效果。他们按习惯把照片拿在眼前 12 ～ 15 厘米的地方，因此他们看到的不是单纯平面的图画，而是像在实体镜里看到的那种立体形象了。

现在我相信读者一定会同意，过去由于自己的无知，没有能够从照片上得到它所能够提供给我们的全部效果，以致时常埋怨照片的呆板平淡。全部问题在于我们没有能够学会把眼睛放在照片前面的适当距离上，而且用了两只眼睛去看那种只预备给一只眼睛看的东西。



放大镜的惊人作用

方才我们说过，患近视的人会把照片上的像看成立体的。那么，有正常视力的人要怎么办呢?他们不能把照片放得离眼很近。还好，幸亏放大镜帮助他们解决了这个困难。如果透过一面放大率2倍的放大镜去看照片，他们就很容易得到方才所说患近视的人所得到的便利，就是可以不必使两眼过分紧张就能够看出照片的立体形象。这样看到的照片上的像跟我们通常从远距离用两只眼睛所看到的照片上的像，有极大的不同。这个*看普通照片的方法*，几乎可以代替实体镜。

为什么用一只眼睛透过放大镜看照片，会看到它的立体形象，现在已经明白了。其实这个事实是早已知道的，但是对于这个现象的正确解释，我们听到的却还不多。《趣味物理学》的一位读者在这个问题上写信给我说：

> 下次再版的时候，请讨论一个问题：为什么透过普通放大镜看照片会呈现立体形象?我的意见是，所有实体镜的一切复杂解释，都是经不起批评的。你用一只眼睛向实体镜望去，不管理论怎么说，看到的还仍旧是立体形象。

读者现在当然已经明白，这个事实一点也不会使实体镜的理论有什么动摇。

玩具店发售的“画片镜”也是根据同一原理制造成功的。用一只眼睛透过这个小巧玩具里的放大镜来看里面的普通风景照片，已经可以得到立体的形象了。一般还喜欢把照片里比较

前面的物体剪出来，放在照片前面，我们的眼睛对于近距离物体的立体形象是很敏感的，而对于那比较远的物体的立体形象感觉得比较迟钝，因此整个立体形象也就更加强了。

照片的放大

能不能让正常的眼睛不用放大镜就能正确地看到照片上的立体形象呢?这是完全能够的，只要拍照的时候用一只焦距大一点儿的镜箱就行了。根据以前各节所说，只要用焦距 25 ～ 30 厘米的镜箱，拍出的照片就可以拿在普通的明视距离上来看(用一只眼睛)——这时候照片就会显出适当的立体形象。

我们还可以拍这样的照片，使你即使用两只眼睛从远距离来看，也不是平面的形象。我们前面已经说过，如果左右两眼从一个物体上得到两个相同的形象，就会感到这是一个平面的画面。但是这种两眼看到的差别随着距离的增加很快地减低下来。实验告诉我们，用焦距 70 厘米的镜箱拍出来的照片，直接用两只眼睛看仍旧可以看得出立体形象。

但是，要照相机全都是长焦距的，也是一件很不便当的事情。因此我们再提出另外一个办法，就是把普通照相机拍得的照片放大。照片经过放大以后，看照片的正确距离也随着加大了。譬如把焦距 15 厘米的镜箱拍得的照片放大 4 倍或 5 倍，那就可以得到所要求的效果了：放大以后的照片已经可以用两只眼睛从 60 ～ 75 厘米的距离上来看了。放大的照片上可能有一些模糊不清的地方，但是并不会有什么不好的作用，因为从远距离上看，这些地方是并不鲜明的；而从得到立体形象这方面来说，无疑是成功的。



电影院里的好座位

常看电影的人一定注意到一件事情，就是有些画面上的物体有非常显著的立体形象：人像仿佛从背景上脱离开来，而且凸出得使人几乎忘记了幕布的存在，仿佛台上有真实的景物和活的演员一般。

这种立体形象，许多人以为是由于影片性质的关系，这是不正确的；正确的原因是因为看的人坐的位置。电影片虽然是用焦距极短的镜箱拍出的，但是它放映到银幕上却用极大的倍数——大约100倍——给放大了，因此可以用两只眼睛在很远的距离上(10厘米×100=1 000厘米=10米)来看。我们在电影里看到最大限度的立体形象，是在当我们看银幕的视角跟拍制影片时候镜箱“看”演员的视角相同的时候。那时候在我们面前的就会是跟原来景物一样的形象。

那么，怎样求出跟这个视角相合的距离呢?这就应该把座位选择在正对画面的中央，还要跟银幕保持这样一个距离，这个距离跟银幕上画面宽度的比,就等于镜头焦距跟影片宽度的比。

拍制影片用的镜箱，一般要根据所拍的对象而不同，分别采用的焦距为35毫米、50毫米、75毫米或100毫米。影片的标准宽度是24毫米。那么，举例来说，对于75毫米的焦距，得到：

$$\frac{\text{所求的距离}}{\text{画面宽度}}=\frac{\text{焦距}}{\text{影片宽度}}=\frac{75}{24}\approx 3$$

这样，要知道在这情形下的好座位跟银幕的距离，只要把画面的宽度乘3就可以。例如映在银幕上的画面宽6步，那么最好的座位应该是在银幕前18步的地方。

给画报读者一个忠告

画报上时常印有许多照片，这些复制出来的照片，当然跟它们原来的照片有同样的性质，假如用一只眼睛在适当距离上来看，也更会显出立体形象来。但是，由于不同的照片是用不同焦距的镜箱拍出的，因此，“究竟要用什么距离来看”的问题，只好用实验来解答。你把一只眼睛闭起来，把画报拿在手里，手臂伸直，使画报的平面跟你的视线垂直，把你张开的一只眼睛对正你想看的照片的正中央。然后，把这张照片逐渐向你眼前移近，你那一只张开的眼睛看着它不要间断，这样你就很容易找到照片最具立体形象的距离。

许多照片平常看来都模糊不清而且都只是平面的，但是，如果采用上面的方法去看，却都会显出它的立体形象，而且看得很清楚。用这种方法去看，照片里的许多别的实体形象就时常可以看到。

让我们再来注意一件事情。假如照片在放大以后可以显得更加生动，那么当它缩小以后，就恰好得到相反的效果。缩小的照片自然显得更加清楚明晰，但是它们都只能够给人平面的感觉，而没有立体形象的感觉。这从上面所讲的道理，应该是很容易明白的：照片一缩小就跟用焦距更小的镜箱拍出来的一样，而普通的焦距本来就已经嫌小了。

以上所说关于照片的一切，在一定程度上对于画家画出来的图画也都适用：看图画的时候最好也取一个适当的距离。只有在这样的条件下，你才能够看到画面上有远近不同，而图画也就显得不是平面的，而是立体的了。看图画的时候，最好也只用一只眼睛，不用两只眼睛，特别当图画不大的时候。



实体镜是什么

我们从现在起，要从图画转到实体上来了，首先我们要提出一个问题：为什么我们能够把物体看成立体的，而不是平面的呢?在我们眼睛的视网膜上所得到的像都是平面的呀！究竟什么缘故使我们觉得物体并不是平面的图画，而是占三维空间的立体呢?

这里有好几个原因。第一，物体表面各种不同的明暗程度使我们有判定它的形状的可能。第二，我们的眼睛要看清楚的物体上远近不同的各部分，眼睛所感受到的张力是不同的：平面图画的各部分跟眼睛的距离是一样的，而立体的各部分的距离却各不相同，要看清楚它们，眼睛就应该做不同的“对光”。但是这儿给我们最大帮助的，还是两只眼睛所收到的同一物体的形象各不相同。这一点很容易证明，只要你先后只用左眼或者只用右眼去看附近的同一个物体就知道了。左右两眼所看到的物体并不一定完全相同；两只眼睛得到不同的形象，也正是这个差异给我们提供了立体的感觉(参阅图 111 和 113)。

现在，设想有两张图画，画的是同一物体，左边一张画出

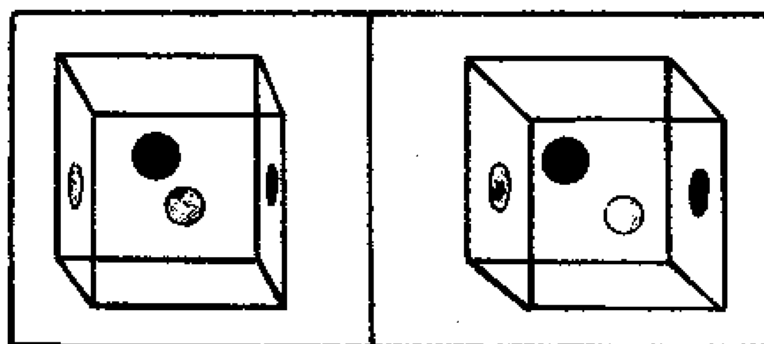


图 113　一个有斑点的玻璃立方块
图示为左右两眼分别看到的不同形象

左眼所看到的，右边一张画出右眼所看到的。假如你看这两张图画的时候，左眼只看左边的一张，右眼只看右边的一张，那么你所看到的已经不是两幅平面图画，而是变成一个凸起的、立体的物体了——甚至比你用一只眼睛看实体所看到的更具立体的形象。要用这样的方法来看两张图画，是靠一种特制的仪器帮助的，这仪器就是实体镜。要使两个像能够融合在一起，在旧式实体镜里是用反射镜的，在新式实体镜里是用凸面三棱镜的。这种三棱镜能够把光线曲折，使得看的人在意识里把光线延长以后，两个像(由于棱镜凸面的作用，像略有放大)会互相重叠。这样看来，实体镜的原理实在是非常简单的，而更奇怪的是这个作用竟可以由这么简单的方法来完成。

大多数读者大概都看见过各种风景之类的实体照片。也许还有一些人用实体镜看过研究地理用的立体模型图。下面我们不打算去谈这种大家多少已经知道的实体镜的应用，只想谈一点许多读者大概还不知道的东西。

我们的天然实体镜

在看实体图的时候，我们也可以不用什么仪器，只要我们把自己的两只眼睛做一番训练，使得能够适当地向实体图望去就可以。这种做法的结果，和通过实体镜所看到的情形一样，惟一的差别，只是这样所看到的形象没有经过放大罢了。实体镜发明以前，大家就正是使用这种天然的方法的。



图 114　凝视两个黑点中间的空隙，继续几秒钟，两点就会融合到一起

下面我预备了一系列的实体



图，依照从简单到复杂的次序排列，希望大家不用实体镜，练习用自己的两只眼睛直接去看。在几次练习之后，就会成功的。[1]

请从图 114 的那两个黑点开始练习。把那张图放近你的眼前，凝视两个黑点中间的空隙，这样一直继续几秒钟，不要把眼光转移；看的时候仿佛是要想看清楚图背后更远的物体的样子。这样，不久之后，你就会看见两个黑点变成了 4 个黑点，——仿佛黑点已经一个分成两个了。接着靠外边的两个黑点渐渐移远了，中间的两个却渐渐接近，最后融合到一起，变成了一点。

请你用同样的方法来看图 115 和图 116。在图 116 上左右两部分融合到一起以后，你会看到眼前仿佛是一根伸得很远的长管子的内部。



图 115　用同样的方法来看这个图，看到了左右两部分融合到一起之后，再继续做下面的练习

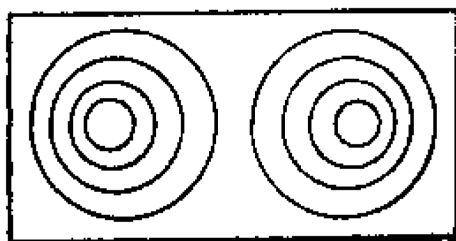


图 116　当这图上左右两部分融合到一起以后，你会看到仿佛是伸得很远的长管子的内部

学会了这个以后，你就可以练习看图 117 了——这儿，你应该看到几个悬空的几何形体。图 118 应该是一座石头建筑的长廊或者隧道。图 119 会让你看到一只透明的玻璃鱼缸。最后，图 120 会给你看到海洋的景致。

学会这种直接看两张并列的实体图的方法并不困难。我的

[1] 应该顺便提出，并不是每一个人都能够看得到立体图形的(即使是通过实体镜)。有些人(例如斜眼的人或习惯用一只眼睛看东西的人)就完全不可能做到这一点；另外一些人，要经过相当长时间的练习才能达到目的；但是也有一些人，主要是年轻人，却能够很快地——15 分钟——就能够把这本领学到。

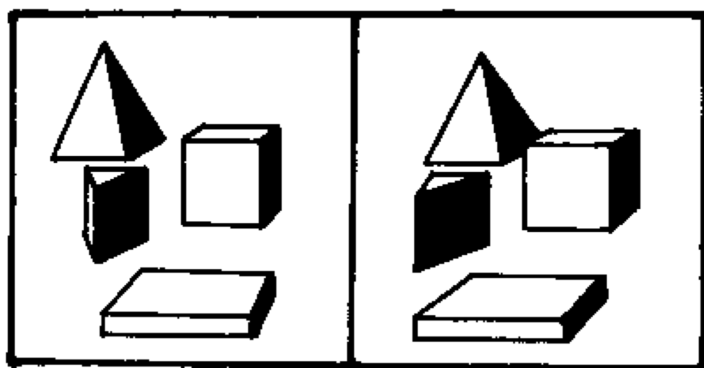


图 117　这图上左右两部分融合到一起以后，仿佛有 4 个悬空的几何形体

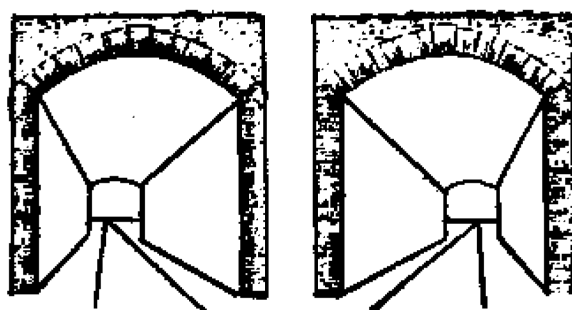


图 118　深远的隧道

许多熟人都在极短时间里经过不多的几次练习以后，就学会了这个方法。戴眼镜的患近视或远视的人，可以不必摘下眼镜，就用随便看什么图画的样子来看；把这些图画拿在眼前前后移动，一直找到合适的距离为止。不管在什么情形，做这种实验的时候，一定要光线充足——这会帮助你得到成功。

你学会了不用实体镜来看上面这些图画之后，就可以用这个本领去随便看什么实体照片，不必用实体镜来帮助了。

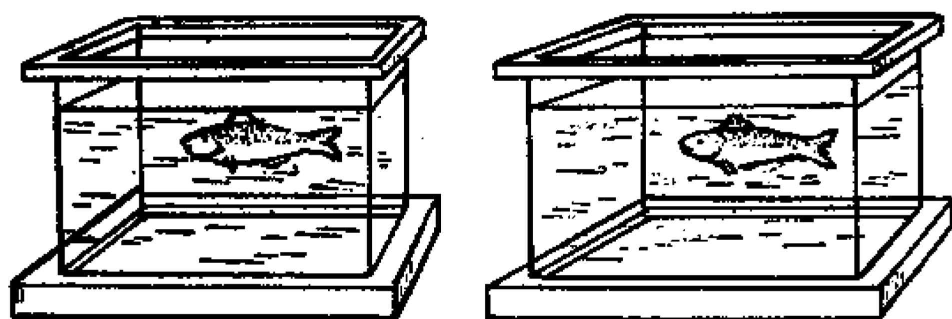


图 119　鱼缸里的游鱼

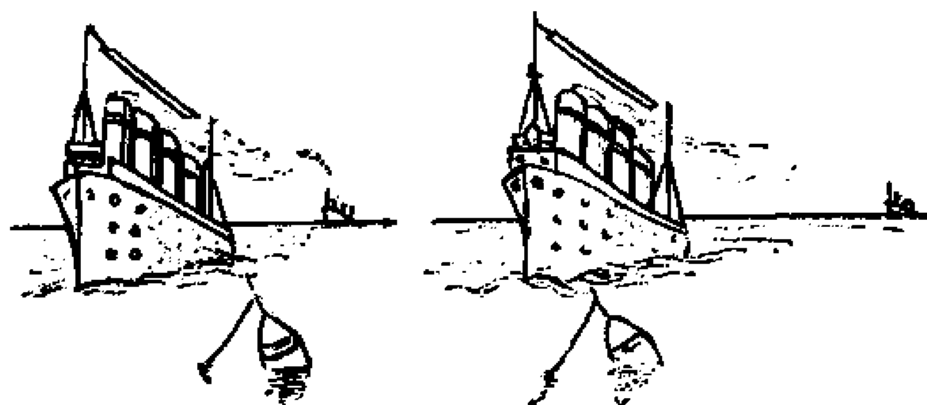


图 120　海上风景

图 121 和图 124 的实体照片，你也就可以用眼睛直接去看。

这儿有一点要注意，就是不要对这个练习过分热心，免得两眼过度疲劳。

假如你没有办法把两只眼睛训练出这个能力，而手头又没法找到一个实体镜，那么你可以找远视眼镜的镜片来帮忙。用一张硬纸板剪出两个圆孔，把这两块镜片粘在圆孔里，使你只能够通过这两块玻璃去看，再在两张并列的图画之间放一块纸片做隔板。这样简单的实体镜就能够很好地完成任务。

用一只眼睛和两只眼睛

图 121 是几张照片。上排左中两图上各有 3 个药房用的小玻璃瓶，这几个瓶仿佛是一样大小的。无论你怎样仔细去看这几张照片，你也不会发现各瓶的大小有什么差异。但是实际上这几个瓶的大小是有差异的，而且还差得很多。这些瓶所以使我们认为同样大小，是因为它们的位置跟我们眼睛或者照相机之间的距离并不相等的缘故：大瓶比小瓶离得远些。那么，图上的 3 个瓶，究竟哪一个离得远，哪一个离得近呢?这是不可能

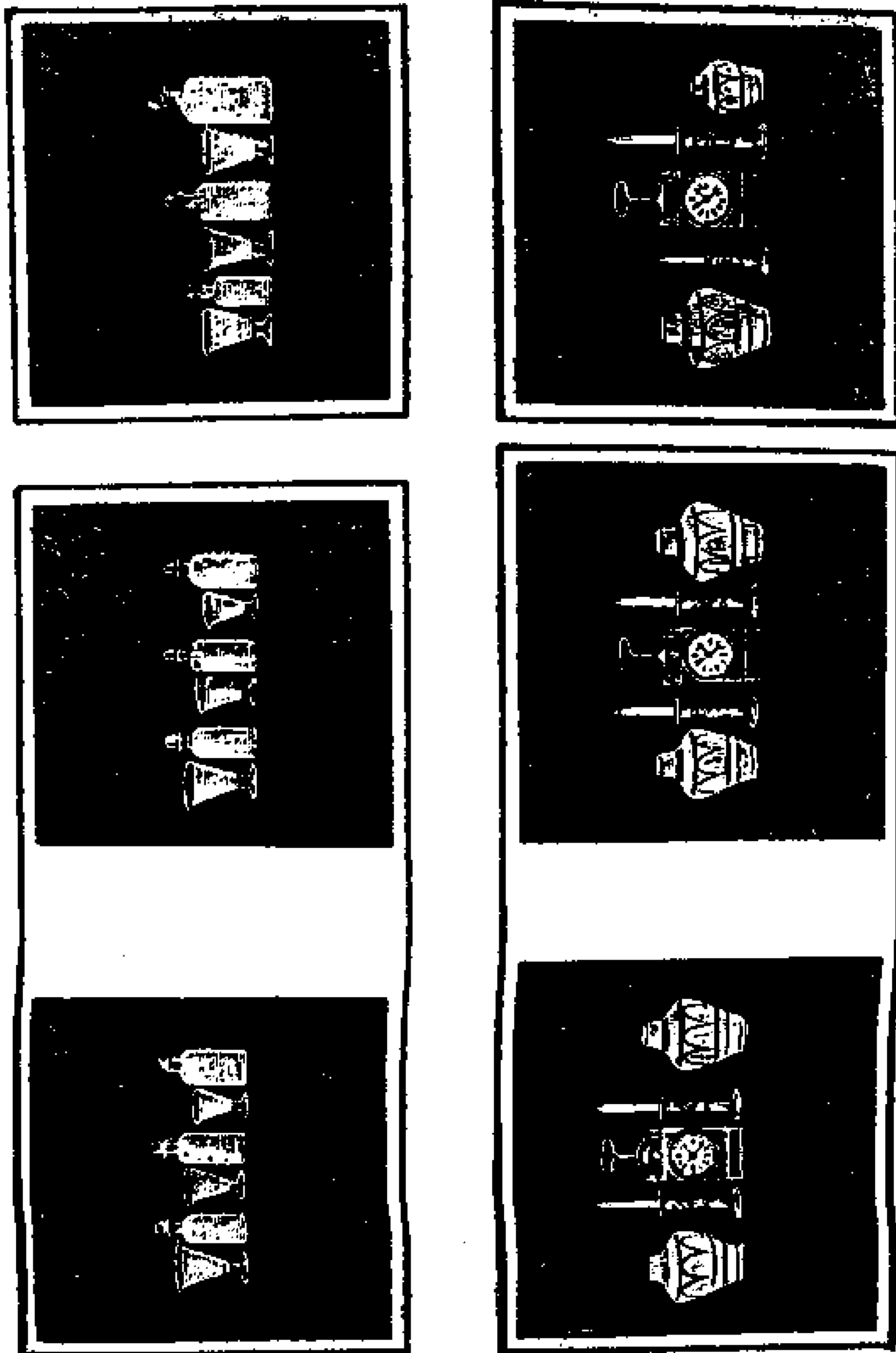


图 121　左：肉眼看到的　右：实体镜里看到的



用普通的看法来判定的。

但是这个题目也很容易解答，只要我们用实体镜或者用方才学到的看实体图的方法来帮助就可以。那时候你会清楚地看到，3 个瓶最右边的那个要比中间那个远得多，而中间那个又比左边远。这 3 个瓶实际大小的比较，就像右图所示。

图 121 下面一排的照片更加奇怪。那照片上有两个花瓶、两支蜡烛和一架钟，看起来两个花瓶一样大小，两支蜡烛也一样大小。但是事实上它们的大小差得很多：左边的花瓶几乎有右边的 2 倍大，而左边的蜡烛却比钟和右边的蜡烛低。这也只要用上面说的看实体图的方法来看，就可以发现原因：原来这些东西并不是排成整齐的一列，而是摆在远近不同的位置上的——大的东西摆得比较远，小的东西摆得比较近。

这样看来，用“两只眼睛”看实体画的方法要比用“一只眼睛”好这一点在这里可以充分证明了。

揭露假票据的简单方法

假定我们有两张完全一样的图画，譬如有两个完全一样的黑方块，我们用实体镜去看，就会看到只有一个方块，这个方块的形状跟原来两个方块中的任一个都没有一点不同。现在，假定每个方块的正中央都有一个白点，那么用实体镜去看，自然也看到这个白点。但是，只要在随便哪一个方块上这个白点略略移动，使它离开正中央的位置，那么就会得到意想不到的效果：你通过实体镜去看，仍旧可以看到一个白点，但它已经不是在方块的同一个平面上，而是在这个平面的前面或后面了！只要两张图画上有少许不同，通过实体镜去看就会产生立体的感觉。



这给我们提供了一个辨别假支票和假造文件的简单方法：只要把须辨别的假票和真票并排放在一起，装在实体镜里，就可以把假票辨别出来，无论这假票造得多么精细，随便哪一个字母、一条线纹上的最小差异，就会立刻给你的眼睛一个特别的感觉，因为在实体镜里看来，这个字母或线纹会孤立在别的部分的前面或背后了。[1]

巨人的视力

当物体离我们非常远的时候——超过450米，两眼之间的距离就已经不能够引起视觉上感象的差别了，因此很远的建筑物、山林、风景等等，只给我们一种平面的感觉。根据同一个原因，天上的星也仿佛都离我们一样远，虽然实际上月球要比行星离开我们近得多，而行星又比那些不动的恒星近得不可计量。

总而言之，对于距离我们在450米以上的物体，我们就完全没法直接看出它的立体形象。它们在我们左右两眼里看起来完全一样，因为两只眼球之间有限的那6厘米距离，跟450米比较起来，实在太小了。因此，在这种条件下面拍得的两张实体照片，就会完全一样，也就不可能通过实体镜看到它的立体形状。

但是这件事情也有办法解决，只要在拍照的时候，从比两眼距离大的两个地点拍摄就可以了。这样拍出的照片，用实体镜望去时所看到的形象，就跟两眼距离增加了许多倍时候所看

〔1〕这个方法最早是在19世纪中叶提出的，但是对于近代纸币却不完全适用。因为近代纸币的印刷技术使印出的东西不可能在实体镜里得到平面的形象，即使两张钞票都是真的也是这样。但是这个方法却可以用来辨别两张同样的书页是同一版印刷的，还是一张重排后重印的。



到的一样。实体的风景照片正是这样拍出来的。人们一般都用放大棱镜(有凸面的那种)来看它们，因此这种实体照片时常会显示出原来物体的大小，得到的效果是非常惊人的。

读者大概也已经想到，我们很可以造出一种双筒望远镜，用来直接看出这些风景的立体形象，不必再经过照片。这种仪器——实体望远镜——的确是有的：它的两个镜筒之间的距离要比平常两眼的距离大，两个像是由反射棱镜投射到我们的眼睛里来的(图 122)。当你向这种仪器望去的时候，真难描写出你的感觉——这感觉竟是不寻常到这样的程度!大自然的整个面目

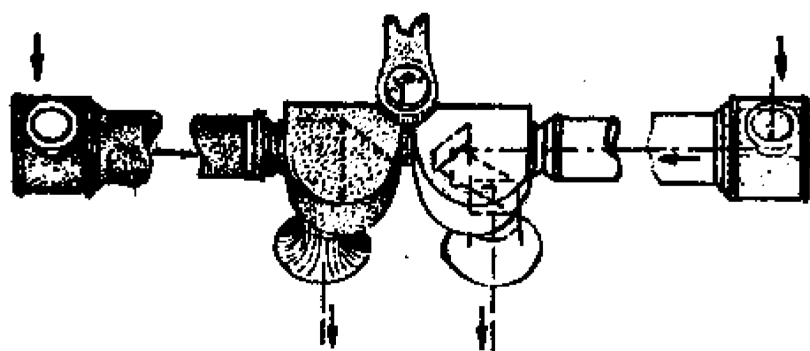


图 122　实体望远镜

都变了。远山变成凹凸不平的了，树木、山岩、房屋、海上的船只——一切都变得凸起来了，已经不是像平面的布景似的，而是在无限广阔的空间里面了。你会直接看到很远的海轮怎样在动，而这当你用普通双筒望远镜去看的时候是看不出的，就好像它是静止的。像这样的地面上的风景，在过去是只有神话里的巨人才能够看到的。

假如这个实体望远镜有 10 倍的放大率，而两个物镜间的距离等于平常人两眼瞳孔距离的 6 倍(就是等于 $6.5\times6=39$ 厘米)，那用它所看到的像就会比用肉眼看到的凸出 $6\times10=60$ 倍。这一点可以用下面的一个事实说明，就是离开 25 公里远的物体，用这种望远镜望去，仍旧能够看得出显著的凹凸。

这种望远镜对于大地测量工作者、海员、炮兵和旅行家都

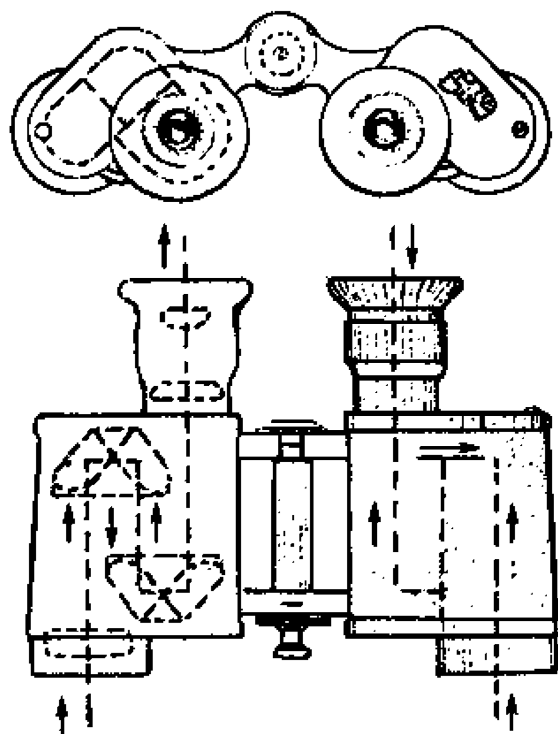


图 123　棱镜制成的双筒望远镜

是很重要的仪器，特别是那种附有测量距离的刻度的实体测距镜更有用。

棱镜造成的双筒望远镜也有这种功能，因为它的两个物镜间距离比两眼距离大(图123)。而观剧镜却相反，它的两个物镜间距离比较小，削弱了立体的感觉，可以使布景不会显出它是假的。

实体镜里的星空

但是，假如我们把实体望远镜向月球或者别的天体望去，我们就看不出一些立体形象。这一点应该是预料之中的，因为天体距离对于实体镜来说实在太大了。你不妨想想看，实体镜两个物镜之间只有 30 ～ 35 厘米的距离，跟地球和某一个行星之间的距离比较，还能够算得什么呢?即使我们能够造出一个巨大的实体镜，使两个物镜之间有几十或几百公里，使用它来观察千万公里以外的行星，也是不可能得到什么实体效果的。

这儿我们又要靠实体照片帮助了。假定我们昨天用照相机拍出了某一个行星的照片，接着在今天又拍了一次；这两次虽然都是从地球上相同地点拍的，但是拿整个太阳系来说，我们是在太阳系里两个不同的地点拍摄的，因为我们的地球在一昼夜里已经



沿着它的轨道走出了成百万公里的路了。因此这样拍出的两张照片是不会完全相同的。假如把这样拍出的两张照片放在实体镜里，那么你看到的就不会是平面的形象，而是立体的了。

因此，我们就可以利用地球的公转，得到从两个相距极远的地点拍摄出来的照片；这样拍出的照片就是实体照片了。你不妨设想一个巨人，他的两眼之间的距离要用百万公里做单位来量，这样你就可以了解，天文学家靠了天体的实体照片的帮助，得到多么不平常的效果了。

把拍成的月球立体照片拿来仔细观看，我们可以看到，形象显著地圆凸起来了，仿佛一位巨人雕刻家用他神奇的刻刀把这平面的、没有生气的大石块给雕刻得生气勃勃一般。它表面上的凹凸是这么清晰，我们甚至能够利用这些照片量出月球上山的高度来。

现在实体镜也用来发现新的行星——那些在火星和木星轨道之间绕转的许多小行星。不久之前，发现这种小行星还只是碰运气的事情。但是，现在只要用实体镜把不同时间拍得的某一部分天空的两张照片比较一下就够了。假如在所拍摄的那部分天空有这种小行星，实体镜就会把它显示出来，因为它是要从总的背景里凸出来的。

用实体镜不但可以察觉两个点在位置上的不同，而且也可以察觉两个点在亮度上的不同。这使得天文学家有可能去找寻所谓“变星”，就是周期地变换亮度的星。假如某个星的亮度在两张照片上显示得不一样，那么，实体镜就会把这变化亮度的星报告给天文学家知道。

最后，人们还拍出星云(仙女座星云和猎户座星云)的实体照片；要拍出这种照片，太阳系已经嫌不够大了，因此天文学家就利用了我们这个太阳系在众星中间的位置变动：由于太阳系在太空中的这个移动，我们经常是从新的地点去看星空的，而且在经过相当长的一段时间之后，我们所看到的星空的差别

会达到连照相机也可以感受到的程度。于是我们先拍一张照片，以后隔一段很长的时间再拍一张，这样拍出的两张照片就可以放在实体镜里去观察了。

三只眼睛的视力

用3只眼睛看东西?难道你有3只眼睛吗?

请往下面读下去吧，我们这里正是要谈3只眼睛看东西的问题。科学虽然不能给人再生一只眼睛，但是它能够使人看到仿佛有3只眼睛才能看到的东西。

让我们从头说起。一个只有一只眼睛能够看东西的人，仍旧能够看实体照片，并且从实体照片得到他原来不可能直接得到的立体感觉。这方法就是把预备给左右两眼看的照片很快交替地在银幕上放映出来就可以了：两只眼睛的人同时看到的东西，独眼的人可以在它们很快的交替中间先后看到。这样所得的结果完全相同，因为很快交替的看在视觉上所引起的感觉，会跟同时看到的一样融合成一体的。[1]

但是假如这样的话，那么有两只眼睛的人就可以用一只眼睛看两幅很快交替着的照片，同时另一只眼睛去看从第三个地点拍摄的第三张照片。

换句话说，可以从一个物体，在3个不同的地点拍出3张照片，就仿佛从3只眼睛看到3个不同的形象。然后把这3张

---

〔1〕有时候我们在电影上可以看到非常显著的凸起的画面，这原因除了前面所说的各项以外，可能也有一部分是由于这里所说的效果，就是说，假如电影照相机在拍摄电影的时候均匀地轻微震动着(它是经常这样在震动的，因为受到卷动底片机构的影响)，那么各张照片会不完全相同；而当它们在银幕上很快变换的时候，在我们的感觉上就会融合成立体的形象了。



照片里的2张很快交替地出现在看的人的一只眼睛前面：在很快交替的作用下，2张照片给这只眼睛提供了立体的感觉。另外一只眼睛在这个时候去看第三张照片，得到的第三个感觉就会跟方才那个立体感觉连结到一起。在这种情形下，我们虽然只用两只眼睛看，但是得到的印象却跟用3只眼睛去看完全一样。这时候立体的感觉达到了很高的程度。

光辉是什么

图124也是复制出来的实体照片，表示两个多面体：一张是白底黑线，一张是黑底白线。假如把这两张图放到实体镜

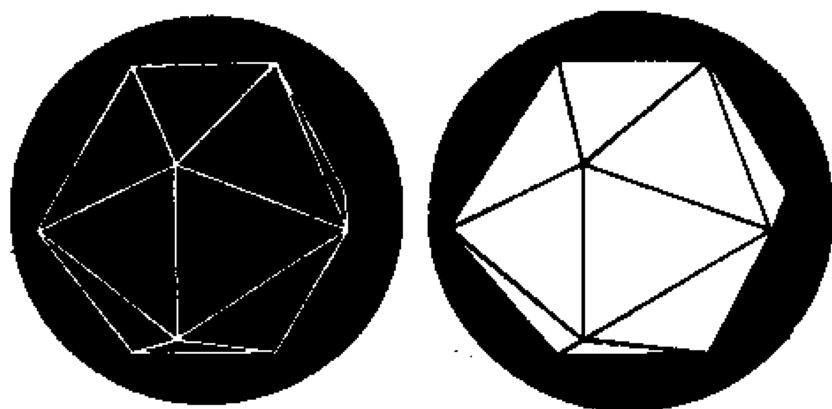


图124 结晶体模型的实体图，放在实体镜里观察，两张图融合在一起，好像在黑色背景上发着光辉

里，你会看到些什么呢?这真使人意想不到。让我们听听赫尔姆霍茨的叙述吧：

> 如果一个平面在一张实体图上用白色表示，在另外一张实体图上用黑色表示，这两张图的像融合的结果就会得到有光辉的感觉，甚至在两张图所用的纸都

是非常不光滑的时候也是这样。用这种方法制出的结晶体模型的实体图，会使人产生一种印象，仿佛结晶体的模型是由光辉的石墨做成一般。利用这种方法，水和树叶等等的光辉在实体镜里会显现得更好看。

在生理学家谢切诺夫著的《感觉器官的生理学·视觉》(1867年)里，可以找到对这个现象的非常中肯的解释：

把明暗程度不同或着色深浅的表面，用实体观察的方法融合到一起的实验，可以使我们看到物体发出光辉的实在条件。粗糙的表面跟光辉(打磨光滑)的表面实际上有什么区别呢?粗糙表面把光漫射到各个方面，因此，无论眼睛从什么方向向它望去，它都使眼睛感到同一的明暗；光滑的表面呢，却只能够把光向一定的方向反射出去。因此甚至可能发生这种情形：人的一只眼睛向这表面看去可以得到许多反射来的光线，但是另外一只眼睛却几乎一点光线也得不到(这些条件正好跟黑白两个表面的实体图融合起来一样)。观察的人两眼分配到不同的反射光线，就是一只眼睛得到的光线比另外一只多，这在观看发出光辉的、打磨光滑的表面的时候是不可避免的。

这样看来，读者可以看到，实体观察法看到的光辉，实实在在地说明了在两个图形的实体融合上，经验起着首要的作用。只有在视觉器官依靠经验，能够把两眼视野的差异跟某一个实际看到的熟悉情形联系起来的时候，两眼视野的冲突才会变成实体的感觉。

我们的结论是这样：人们所以能够看见光辉，原因(至少是原因的一个)是左右两眼得到的像的光度不同。这个原因，假如



没有实体镜的话，就恐怕很难发现了。

在很快动作时候的视觉

前面我们已经说过，同一个物体的不同形象很快交替地映入眼帘，就会产生立体的感觉。

于是发生了一个问题：这种立体感觉的产生，是只限于不动的眼睛接受到交替着的形象的时候，还是在反过来的情形也可以产生同样的效果，就是形象不动，看这形象的眼睛却很快地移动?

这一点，大家一定猜到，就是在这情形下一样可以得到立体的效果。大概许多读者一定曾经发现到，从行驶的火车里拍摄的电影画面会给人一种不寻常的立体感觉，并不比实体镜里看到的差。当我们乘火车或汽车很快行驶的时候，如果适当注意我们看到的视觉上的印象，也能够直接证明这一点：这样观察的风景，会使你有立体的、远近分明的感觉。我们知道，一只不动的眼睛看东西的时候只能够分辨 450 米以内物体的远近，而在车上看的时候，这个距离的限度会显著增加，可以比 450 米远很多。

我们从行驶很快的车窗口望出去，看到外面的风景觉得很生动，不正就是这个原因吗?从车窗口望出去，远的地方仿佛正在后退，我们从那四围伸展得很远的地平线能够清楚地看得出大自然的宏伟。当我们乘着行驶很快的汽车驶过树林的时候，也由于同一个理由，我们觉得每一株树、每一根树枝、每一片树叶都显得很突出，分得清清楚楚的，而不是混在一起，像一个固定不动的观察的人所看到的那样。

当我们的汽车在山地上沿着公路很快行驶的时候，我们的

眼睛也能够直接看出整个地面的起伏，山和谷也显得格外高低分明。

这一切，独眼的人也都可以看到，这些对他们简直是完全新鲜、从来没有见过的。我们已经指出，要得到立体的视觉，完全不像一般人所想象的那样，一定要用两只眼睛来看，这种立体视觉也可以用一只眼睛得到，只要有不同的画面用足够的速度交替着就行。[1]

要证明方才所说的很容易，只要你坐在火车或汽车里看外面的时候多注意一点就行了。这时候你可能发现另外一个现象，这个现象人们早在100年前就已经知道(但是，已经忘了的东西也不妨算是新的)：在车窗近旁很快闪过的物体仿佛缩小了一般。这个事实跟实体观察法很少有关系，这只是因为我们看见这么快闪过的物体，就错误地认为它离我们很近罢了；因为我们知道，放得近的物体，我们看起来有多大，它的实际大小也差不多，放得远的物体，我们看起来不大，实际上要比看到的大，因此我们平常判断一个物体大小，常常不自觉地把这一点估计进去了。这个解释是赫尔姆霍茨提出来的。

通过颜色眼镜

假如你通过红色玻璃去看写在白底上的红字，你会只看到一片红色，别的什么也看不见，什么字迹都不可能看见，因为红颜色的字迹和同样红色的底子融在一起了。但是如果经过红

[1] 从转弯中的火车上拍电影，假如所拍的物体是在转弯曲线的半径方向上，拍出的影片就会有极显著的立体形象。这一件事实也可以用同样的理由来解释。这种所谓“铁路效果”，电影摄影师都知道得很清楚。



玻璃去看写在白底上的灰色字迹，你就会看到红色底子上的黑色字迹。为什么是黑色字迹，这一点很容易明了：红色玻璃不让灰色光线通过(正因为它只让红色光线通过，因此它才是红色的)；因此在灰色字迹的地方，你应该看到那里没有光，也就是说，看到了黑色的线纹。

所谓“凸雕”的作用，就是根据颜色玻璃的这个性质的(凸雕画是用特别方法印制出来的，有跟实体照片相同的效果)。在凸雕画上，左右两眼所看到的两个形象是重叠地印在一起的，两个形象的颜色不同：一个灰色，一个红色。

要从这两个颜色形象看到一个黑色立体形象，只要戴上颜色眼镜去看就可以了。右眼通过眼镜的红玻璃，只看到灰色的形象，就是只看到右眼应该看到的那个形象(当然右眼所看到的是黑色而不是灰色的)；左眼呢，通过灰色的玻璃也只看到这只眼睛应该看到的红色的形象。每只眼睛只能看到一种形象——它应该看到的形象。这样一来，我们又有了跟实体镜相同的条件，因此结果也应该相同，得到立体的形象了。

“影子的奇迹”

电影院里时常可以看到的“影子的奇迹”，也是根据方才所说的原理来的。

所谓“影子的奇迹”，就是在走动着的人映在银幕上的影子会给观众(戴有双色眼镜的观众)提供立体形象，仿佛从银幕前面凸出来了一般。这也是利用两种颜色所起的实体的效果。如果我们要把某一个物体的影子凸出在银幕上，就把这个物体放在银幕和两个并列光源——红绿两色——中间。于是银幕上就得到两个颜色的影子——一个红色，一个绿色，有一部分互相

重叠。观众呢，是透过两片颜色玻璃(红绿两色)的眼镜向这两个影子望去，而不是直接用眼睛去看的。

我们方才讲过，在这种情形下，就会看到形象仿佛从银幕平面上向前凸了出来一般。这种“影子的奇迹”非常好看，有时候就好像一件东西丢出来，正向观众飞过来似的；或是，一只巨大的蜘蛛正在空中向观众走来，使得观众不由惊呼起来，习惯地掉转头去。

这儿整个“机关”是非常简单的，看图 125 就可以明白了。图上左侧表示红绿两灯，P，Q 是放在灯和银幕中间的物体；旁边注有“红”、“绿”字样的 p 和 q 表示这两个物体射在屏幕上的颜色的影子，P_1 和 Q_1 表示看的人通过红绿两玻璃片能够看见这两个物体的位置。当幕后做道具用的“蜘蛛”从 Q 移到 P 点的时候，看的人就会觉得它仿佛从 Q_1 爬到 P_1 一样。

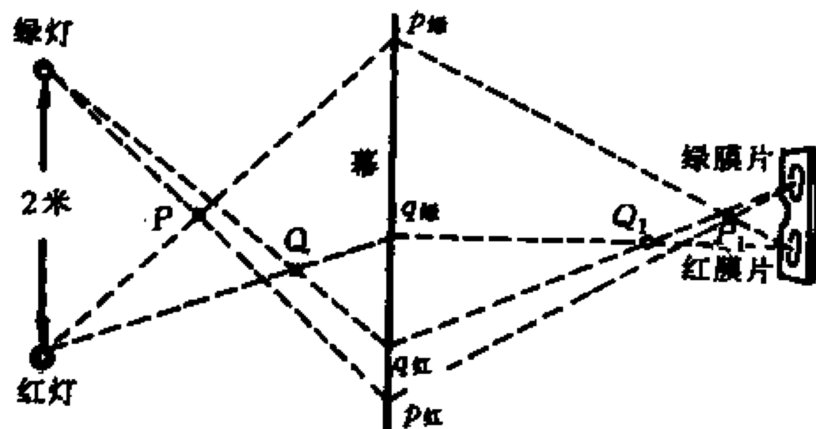


图 125　“影子的奇迹”的秘密

一般说来，那物体在幕后向光源接近，使得幕上的影子放大，就会使有的人产生一个错觉，仿佛这物体从银幕向看的人走来。看的人感到物体仿佛从银幕向他飞去，实际上恰好是依相反方向——从银幕向光源——在移动的。

颜色的意外变化

有一个“趣味科学宫”里面，有一套实验极受观众欢迎，把这套实验在这里提出来，应该是很合适的。一个大房间的角落里，有跟大客厅里一般的陈设。在那里你可以看见罩有暗橙色布套的木器，覆着绿色台布的桌子；桌上是盛着红色果子汁和花朵的玻璃瓶；书架上排满了书，书脊上有各种颜色的字。起初，这一切都是在白色灯光下的，接着，旋动了开关，白色灯光变成红色。这使得客厅里起了意想不到的变化：木器变成玫瑰色的了；绿色的台布变成了暗紫色；瓶里的果子汁变成跟清水一般没有颜色了；花朵也全变了颜色，变成了另外一种花了；书脊上的字呢，连痕迹也不留地消失了……

继续旋动开关，室内就充满了绿色的灯光，于是整个客厅的陈设又变得使你认不得了。

这些有趣的变化可以很好地说明物体色彩的理论。这理论基本的一点就是，物体表面的颜色总不是它所吸收的光线的那种颜色，而是它所反射的光线的颜色，也就是投向看的人的眼里的那个光线的颜色。这情形可以归纳成这样：

“当我们用白色光线照射物体的时候，红色是因为绿色光线被吸收而形成的，绿色是因为红色光线被吸收而形成的，在这两种情形下，其余的颜色是都显现出来的。可见，物体是用不寻常的方法得到它的颜色的：有颜色不是加上什么的结果，而是减去什么的结果。”

因此，方才那块绿台布在白色灯光下所以显出绿色，就是因为它能够反射绿色的以及在光谱上跟绿色相近的光线；至于其余的光线，绿色台布只能反射微小的一部分，大部分却给吸

收了。假如把红紫两色的混合光线射到这块台布上，这块台布反射的就几乎只是紫色的光线，而把大部分红色光线吸收，因此眼睛就得到暗紫色的感觉。

那个客厅里的一切颜色变化，原因大概就是这样。值得怀疑的只有一件事情：为什么那瓶红色的果子汁会在红色灯光下面变成仿佛没有了颜色?这问题的答案，是因为这个瓶下面垫着一块白色的布，这块布铺在绿色的台布上。假如把瓶从白布上拿下来，那么就会发现，在红色光线下面，瓶里的液体不是没有颜色，而是红色的了。这液体只在跟白布放在一起的时候才会显得没有颜色，原因是白布在红色灯光下面变成了红颜色，但我们由于习惯并且由于跟深颜色台布的对比，继续把它认做白色的，而瓶里液体的颜色跟我们认做白色的台布的颜色一样，因此我们会不自觉地把瓶里饮料也看成白色；于是它在我们眼里就已经不是什么红色果子汁，而成了没有颜色的水了。

上面这个实验，也可以简化一下：只要找些不同颜色的玻璃片，透过它们去看四周的东西，就可以得到相仿的效果。

书的高度

试请你的朋友用手指在墙壁上指出，他手里拿着的一本书假如齐墙根竖立在地板上的话应该有多高。等他指出之后，你把那本书放到墙根去比一下：书的实际高度竟几乎只有你那朋友所指的一半。

假如你不让你的朋友弯下腰去在墙上指出高度，只叫他口头说明这本书应该高到墙上的什么地方，那么这个实验就会得到更好的效果。自然，这实验不只限于拿书来做，也可以用灯泡、呢帽或别的我们平常总是用眼睛平看的东西。



这儿发生错觉的原因，是在于我们顺着某一个物体的长度方向望过去，这个长度总会显得短一些。

钟楼上时钟的大小

方才你的朋友在判断书的高度的时候所造成的错误，我们在确定很高地方的物体的大小的时候也经常会发生。譬如，在我们确定钟楼上时钟大小的时候，得到的错误会特别显著。我们大家自然都知道这种钟是非常大的，但是我们所想象的它的大小，总要比它实际的小。图 126 是伦敦韦斯敏斯德寺院顶上的时钟钟面卸下到马路上的情形。人跟这只钟相比，简直小得像甲虫一样了。还有，你看到图中那座钟楼，再看马路上的时钟，你一定不肯相信那钟楼上的圆孔会装得进这只时钟的。



图 126　韦斯敏斯德寺院顶上的时钟大小

白的和黑的

请从远处向图 127 望去，告诉我下面的黑点跟上面随便哪



一个黑点之间的空隙里，能够容纳得下几个一样大小的黑点——4个呢还是5个？我想你一定会很快回答，放4个太宽，放5个怕又放不下。



图127 下面的黑点跟上面随便哪一个黑点之间的空隙，看起来仿佛比上面两点外端边缘之间的距离大些。实际上两个距离是相等的

但是，假如我现在告诉你，说那个空隙里一共只能够容纳3个黑点，不能够再多放了，你一定不会相信。那么就请你拿一条纸条或者两脚规去量一下，证明我的话并没有错。

这里黑色的一段距离在我们的眼睛里看去觉得比同样长短的白色的一段距离短，这个错觉叫做“光渗现象”。这个现象是由于我们眼睛不够完善所产生的，因为如果把我们的眼睛当作一种光学仪器的话，还不能够百分之百地适应光学的严格要求。眼睛里折射光线的介质在眼球网膜上形成的像的轮廓，比不上在校准得很好的照相机的毛玻璃上所得到的那么清楚：由于所谓“球面像差”作用的结果，在每个光亮的轮廓外面有一圈光亮的镶边围绕着，这镶边就会把这轮廓在眼球网膜上放大，结果使得光亮的部分看起来仿佛比跟它相等的黑色部分大。

大诗人歌德，是一个自然现象的精细的观察者（虽然不一定是一个足够深入的理论物理学家），在他的《论颜色的科学》里，写过下面的一段话：

深颜色的东西看起来要比同样大小的鲜明颜色的东西小。假如把画在黑色背景上的白圆点跟画在白色背景上的同样大小的黑圆点同时放在一起看，会觉得黑圆点要比白圆点小1/5。假如把黑圆点适当地放大，那么两种圆点看起来就仿佛相等了。一弯新月看起来



仿佛是比月面的阴暗部分(有时候它是可以看得出的)有更大直径的圆的一部分。穿深色衣服的人，要比他穿鲜明颜色衣服的时候显得瘦些。从门框后面看一盏灯，可以看到正对那灯的门框旁边仿佛缺了一些。放在烛光前面的一把尺，在正对烛光的地方显出有一个凹痕。日出和日落的时候，地平线上都仿佛有一个凹陷似的。

歌德的这些观察，大体上都是正确的，只有一点，就是白圆点并不一定比黑圆点大几分之几。这个差数是随着我们看这两个圆点的距离的增加而提高的。下面我们就可以明白为什么是这样的了。

试把图 127 移得远些，那么你所得到的错觉也就更加厉害，更加惊人，这个解释是那镶边的宽度总是不变的；因此，假如它在近距离的时候把光亮部分加宽了 10%，那么在远距离的地方当形象的本身减小了的时候，这加宽的就不只是 10%，而会是加宽了 30% 或 50% 了。

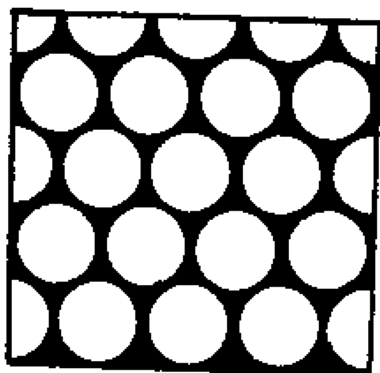


图 128　在比较远的地方望去，圆点变成六角形了

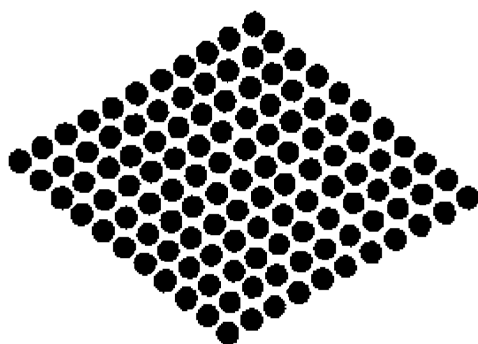


图 129　黑圆点从远地方看去也变成了六角形

我们眼睛的这个特点，一般还解释了图 128 的那个奇怪的性质。这个图当你近看的时候，看见的是黑色背景上的许多白圆点。但是如果你把书移到比较远的地方，从 2 ～ 3 步远的地方，或者，假如你的视力好的话，就从 6 ～ 8 步远的地方向它

望去，这图就完全变了一个样子：你看到的已经不是白圆点，而是像蜂房一样的白色的六角形了。

有人把这个错觉用光渗现象来解释；但当我发现，虽然光渗现象不会把黑圆点放大，只会缩小，可是白底上的黑圆点从远地方看仍旧会像六角形(图 129)，这个说法就不能使我满意了。我们应该说，关于视觉上的错觉，现在所有的解释都不能够认为是十分完备的，许多错觉甚至到现在还没有找到它的解释。

哪一个字母更黑些

图 130[1] 使我们认识了人的眼睛的另外一个不够完善的地方，认识了所谓“像散现象”。

假如你用一只眼睛向图 130 望去，你会感到这 4 个字母仿佛并不是一样黑的。就请你认出哪一个字母最黑，然后从图的侧面再向这 4 个字母望去。这样就会发生一个意外的变化：方才那最黑的字母已经变成灰色的了，而现在最黑的字母，已经是另外一个了。



图 130　请用一只眼睛来看这图，4 个字母里面，就有一个显得仿佛更黑些

实际上这 4 个字母黑的程度都是一样的，只是涂着不同方向的阴影线罢了。假如眼睛的构造跟最好的玻璃透镜完全相同，那么阴影线的方向就不会影响到字母的黑色程度。可是我们的眼睛对于各种方向上的光线并不是完全一样地折射的，因此我们就不可能同时清楚地看到垂直、水平以及斜向的线条。

[1] 图上是 4 个俄文字母，这 4 个字母组成的单词，意思是眼睛。



完全没有这个缺点的人是很少有的，有些人的眼睛，像散作用达到了严重的程度，以至显著地妨碍了他的视觉，降低了视觉敏锐的程度。这种人要能够清楚地看到东西，就得戴上特制的眼镜。

人的眼睛还有别种缺点，可是制造光学仪器的技师却能把这种缺点克服。赫尔姆霍茨对于这些缺点曾经这样表示："假如有一个光学仪器制造家想把有这些缺点的仪器卖给我，我认为我有权利用最不客气的方式指出他的工作的不经心，把他的仪器还给他，并向他提出抗议。"

但是，除了这些由于人体构造上的缺点所引起的错觉之外，我们的眼睛还会接受一系列的欺骗，这些欺骗是完全有另外一套原因的。

活的相片

我想大家一定看见过两眼向我们望着的相片，相片上的人不但一直向我们看着，而且还用他的两眼监视着我们的行动：我们走到东，它就望到东，我们走到西，它就望到西。这种相片的奇异特性还在很久以前就被人们注意到了；许多人对它都感到谜似的难解，而神经质的人时常会被它吓得惊慌失措。

这种情形，在果戈里写的《相片》一文里，有很好的描写：

> 那两只眼睛盯住了他，就好像除他之外，不愿意再看别人一般……相片不顾四周所有的一切，一直向他盯着，仿佛要盯进他的身体里去似的……

关于相片上的眼睛的这种特性，有过不少迷信的传说（就在



图 131　奇怪的相片

那篇《相片》里也有提到)，但是实际上这个谜底却很简单，揭开来，也不过是视觉的一种错觉罢了。

整个的解释只有一句话，就是因为这种相片上的两只瞳子都画在眼睛的正中央。一个向我们望着的人，他的两眼就正是这个样子的；但是当这个人向我们旁边看去的时候，他的瞳子和整个眼球的彩帘，我们看去就已经不在眼睛的中央，而是略向一边移转了。我们离开相片向一边走去，相片的两个瞳子并不改变它们的位置，仍旧留在眼睛的正中央，而且我们看到的整个面孔也仍旧在原来的位置上，于是我们会很自然地感到相片仿佛向我们这边掉转了头来监视着我们了。

同样的方法，可以用来解释某些图画上相似的特点：一匹马在图画上一直向我们奔来，不管我们避开到什么地方；一个人永远向我们指着，他的向前伸出的手永远一直指向我们，等等。

图 131 就是这种情形的一个例子。这样制出的大幅图画常常用来做宣传鼓动工作或者用来做广告。

假如我们把这一类错觉的原因好好想一下的话，那么就会明白，这里面不但没有什么值得惊奇的地方，而且恰恰相反，假如图画没有了这种特性，倒是值得惊奇的了。

插在纸上的针和视觉上的别种错觉

图 132 画着一组大头针，初看并不觉得有什么特别的地方。现在请你把书放平，提高到跟眼睛相齐，闭上一只眼睛，



用一只眼睛从针尖那一边望过去，使你的视线恰好沿着每一根大头针滑过(要把眼睛放在这些直线的延长线相交的一点)。这样，你就会觉得这些大头针不是画在纸上而是直插在纸上。把头略向一旁移动，你就会看见，仿佛这些大头针也都向这方向倾斜过去一般。

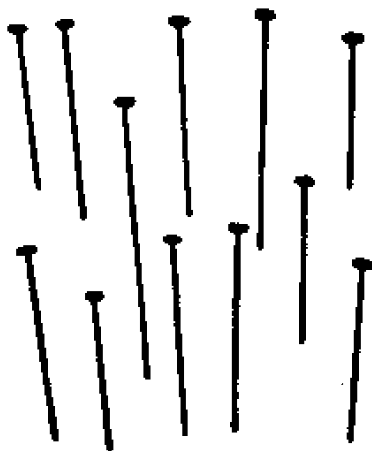


图 132　把睁开的一只眼睛放在这些直线相交的地方，就会看到许多大头针仿佛是插在纸上的

这个错觉可以用透视定律解释：图上的直线恰好跟你用上面所说方法看去的时候许多竖立着的大头针的投影一样。

我们时常要听从错觉的支配，但是这一点不能够完全认为是视觉上的缺憾。它也有非常有利的方面，一般人就时常忘记了这一点。问题在于，假如我们的眼睛不受任何错觉的作用，那么就不可能有绘画，我们也要失去欣赏一切美术的机会了。美术家正是广泛地利用了人类视觉上这个缺点的。

18 世纪的学者欧拉在他的有名的《有关各种物理资料书信集》里写道：

> 整个绘画艺术是建筑在这个欺骗上的。假如我们习惯按真实的情况去判断物体，那么，美术就没有地位，跟我们瞎了眼睛一般。那时候美术家会枉费了放在调色上的全部心机；我们会对他的作品这样说：这儿是一块红斑，这儿是灰色的，那儿呢，一片黑的和一些白线；这一切都在同一个平面上，看不到什么距离上的差别，而且也一点不像什么东西。无论这幅作品上画着些什么，对我们说来，就会像纸上写的信一样……在这种情形下，我们失去了愉快的有益的美术

每天给我们带来的乐趣，不是会觉得可惜吗？

光学上的“欺骗”非常之多，我们可以把视觉的错觉的各种例子收集成整本册子，这里面有许多大家都已经很熟悉，也有一些知道得还比较少。下面让我再举几个大家不大熟悉的有趣的例子。



图 133　字母都是竖直的

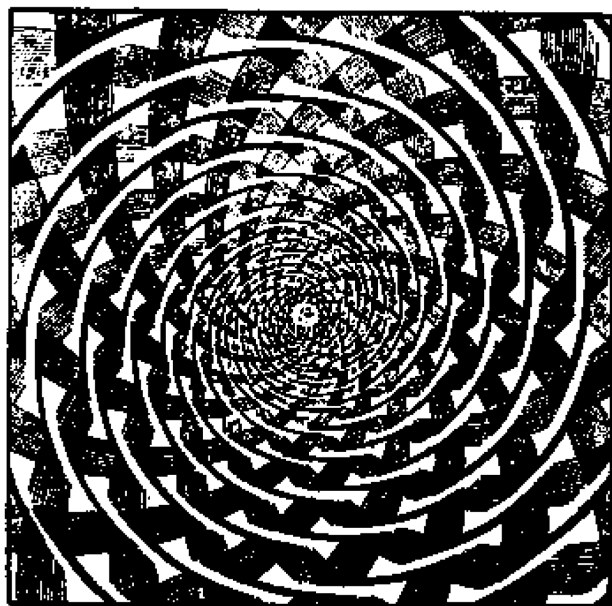


图 134　图上曲线看来仿佛是螺旋形，实际上却是一些圆，只要用铅笔画一下就知道了

图 133 和图 134 是画在格子背景上的图，这两张图的效果都很好：你的眼睛一定不肯同意说图 133 上的字母[1]是竖直的，而你更难同意的是，图 134 上画的图竟不是一个螺旋形！你只好用直接的实验来断定：把铅笔尖放到你认为是螺旋的线纹上，沿着那曲线画过去，就会知道你自己的判断错

[1] 这 4 个俄文字母组成的单字，意思是影子。



了。同样，你可以利用两脚规来证明图 135 上 AC 线并不比 AB 线短。至于图 136、137、138、139 的详细情形，可以看各图的说明。

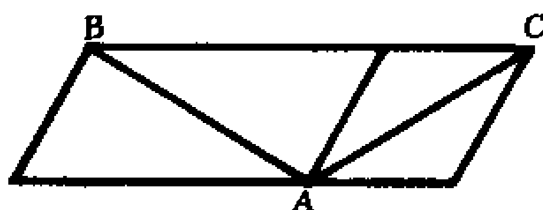


图 135　*AB* 和 *AC* 两线段相等，但是一眼望去，觉得 *AB* 似乎长些

图 138 所生的错觉，竟严重到这样的情形：这本书

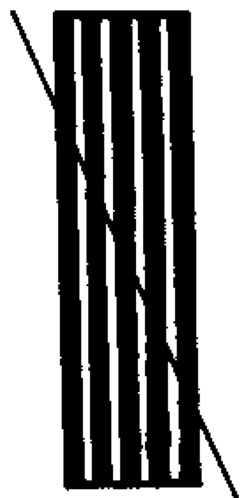


图 136　横过竖线的斜线，好像是折曲的

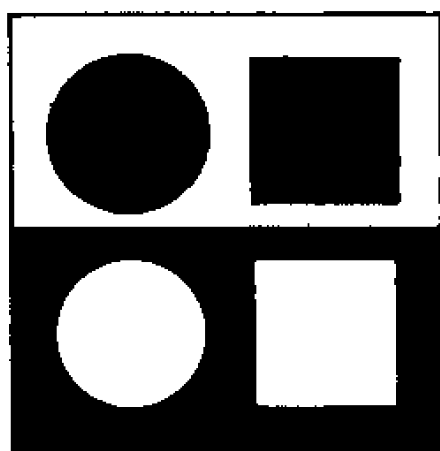


图 137　白方块和黑方块一样大，白圆点和黑圆点也一样大

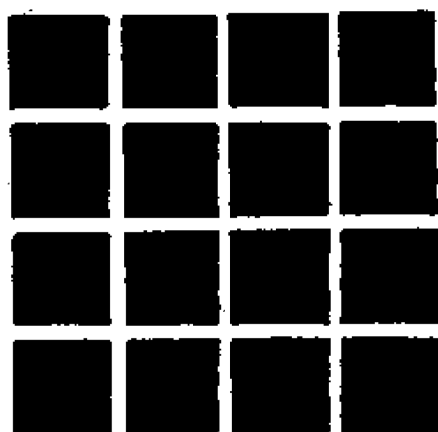


图 138　在白线交叉的地方，会有一些略带灰色的方斑点忽显忽灭，像闪烁一般。事实上这些线是完全白的，只要用纸片把上下行黑块遮起就可以看到了。这是对比的结果

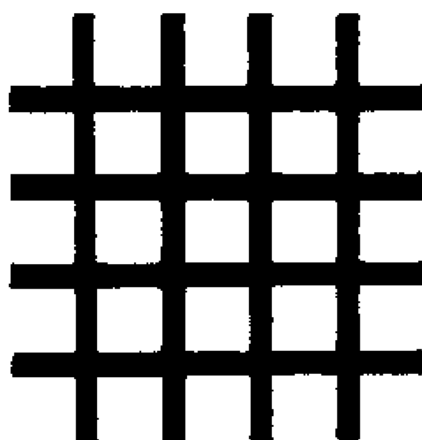


图 139　黑线交叉的地方，显出了灰色的斑点

最初排印某一版的时候，发生过一件趣事，当出版者从制锌版的人手里拿到了这图的锌版，竟认为那锌版还没有做完，准备送回制版的人，叫他把白线交叉地方的灰色斑点去掉。我凑巧走进去，才给他解释明白了。

近视眼怎样看东西的

患近视的人没有眼镜的话，是看不清楚比较远的东西的；但是他们在不戴眼镜的时候究竟能看见些什么，他们所看到的东西究竟是什么情形，这却是有正常视力的人难以理解的。但是患近视的人既是那么多，去了解他们所看到的周围世界是什么样子，也应该是一件有益的事情。

首先，患近视的人(自然这里是指没戴眼镜的人)永远不可能看到线条分明的轮廓，一切东西对他们来说都有模糊的外形。一个视力正常的人，向一株大树望去，能够清楚地在天空背景上辨出个别的树叶和细枝。患近视的人却只看到一片没有明显形状的模糊不清的幻觉般的绿色，细微的地方是完全看不到的。

对于患近视的人，人的面孔要比正常视力的人所看到的更年轻更整洁，因为面孔上的皱纹和小斑疤他们都看不见，粗糙的红色的皮肤也像是柔和的苹果色。我们有时候会觉得奇怪，某人判断别人的年龄往往会差了20岁；对于美的鉴别力，很奇怪，他时常一直把头伸到我们面前来向我们看，仿佛从来不认识一样……这一切常常不过是由于他近视的缘故罢了。

一个患近视的人不戴眼镜跟你谈话的时候，他根本看不清你的面孔，至少他所看到的，跟你所预料的不同：在他面前只是一个模糊的轮廓，看不出面孔上什么特点，因此，一小时后

假如他再碰到你，他已经不认识你了。患近视的人辨别一个人，大多是根据对方的声音，而不是根据对方的外形。他们在视觉上的缺憾是从听觉的敏锐上得到补偿的。

研究一下夜里的情形对于患近视的人是怎么一回事也是很有趣的事情。在夜里的灯光下面，一切光亮的物体，像电灯、照得很亮的窗玻璃等等，对于患近视的人都变成很大，他所看到的就是不规则的光亮斑点和一些黑影。街灯在患近视的人看来只是二三个大光点，笼罩了街道上别的部分。他们看不见驶近的汽车；看到的只是两个明亮的光点(头灯)，后面只见黑漆漆的一大片。

甚至连夜里的天空，患近视的人所看到的也跟正常视力的人大不相同。患近视的人只能够看到的，不是几千颗星，而只有几百颗星。但是这几百颗星在他看来却像一些很大的光球。月亮在患近视的人看来显得非常大而且好像非常近;“半月”在他看来形状很复杂，很奇怪。

这一切歪曲以及仿佛放大的原因，当然是由于患近视的人的眼睛构造上有了毛病。患近视的人眼球太深了，它收到的外面物体上每一点所发的光线，不能够恰好集中在视网膜上，而是在网膜的前面。因此光线射到眼球底部的视网膜的时候，已经又散了开来，以致造成了模糊的像。



10 声音和听觉



怎样寻找回声

谁都没有看到过它，
听呢——每个人都听到过，
没有形体，可是它活着，
没有舌头——却会喊叫。
——涅克拉索夫

马克·吐温写过一个笑话，说到一位不幸的收藏家想拍集……你猜搜集什么?搜集回声!他不辞劳苦地收买了许多能够产生多次回声的土地。

首先，他在乔治亚州收买回声，这地方的回声可以重复4次，接着跑到麦里兰去买6次回声，以后又到美恩去买13次回声。接下去买的是堪萨斯的9次回声，再下去是田纳西的12次回声，这一次买得非常便宜，因为峭岩有一部分崩毁了，需要加工修理。他以为可以把它修理好，但是担任这个工作的建筑师却向来没有过把回声变成3倍的经验，因此终于把这件事情搞坏了——加工完毕以后，这地方恐怕只适宜给聋哑的人去住了……

这当然只是开玩笑；但是很好听的多次回声却也的确在地球上各地方存在的，有的很早就已经引起大家注意，变成全世界出名的地方了。

这里可以提几个有名的回声的例子：在英国的武德斯托



克，回声可以清楚地重复 17 个音节，格伯士达附近迭连堡城的废墟能够得到 27 次的回声，后来，一堵墙壁给毁坏了，这回声才“静默”下去。原捷克斯洛伐克的亚德尔士巴哈附近一个圆的断岩，在一定的地方上可以使 7 个音节有 3 次重复的回声，但是离这个地点几步，即使步枪的射击也不会发生回声。更多次数的回声曾经在米兰附近的一座城堡(现在已经不存在了)听到过：从侧屋窗子放出的枪声，回声重复了 40 ～ 50 次；大声读一个单词，也能够重复 30 次之多。

山地里的回声跟平地上不同，种类很多，可是听到的机会反而少。在山地里，要听到回声比在树林环绕着的平地里困难。

你就会明白这是什么原因的。回声实际上就是从某个障碍物反射回来的声波，它和光的反射一样。“声线”(就是声波传播的方向)的入射角也等于它的反射角。

现在请设想你站在山脚下(图 140)，而那会把你的声音反射回来的障碍物比你站立的位置高，例如在 *AB* 的地方。这儿不难看到，沿着 *Ca*，*Cb*，*Cc* 等线向前扩展的声波，经过反射，就不会到达你的耳朵，而在空间沿 *aa*，*bb*，*cc* 等方向散射开去。假如你站立的位置和障碍物在同一水平或者比障碍物高(图 141)，那么情形就两样了。沿 *Ca*，*Cb* 向下传播的声音，沿 *CaaC* 或 *CbbbC* 折线，从地面反射一二次后，会又回到我们的耳边来。两点之间地面的凹陷，会使回声更加

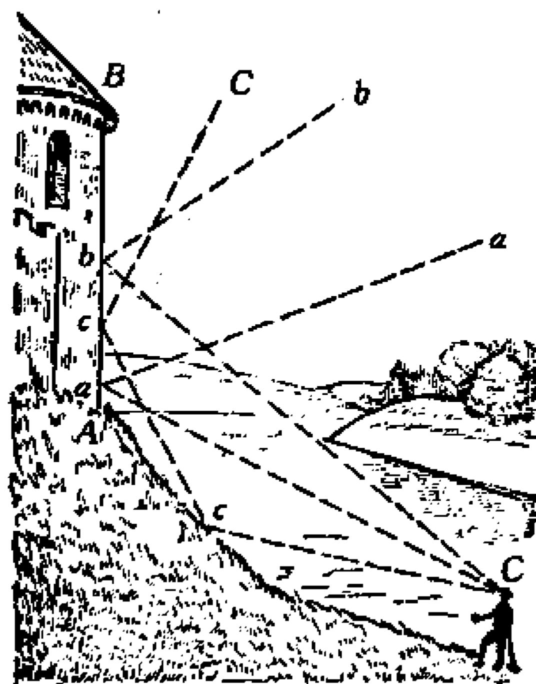


图 140　没有回声

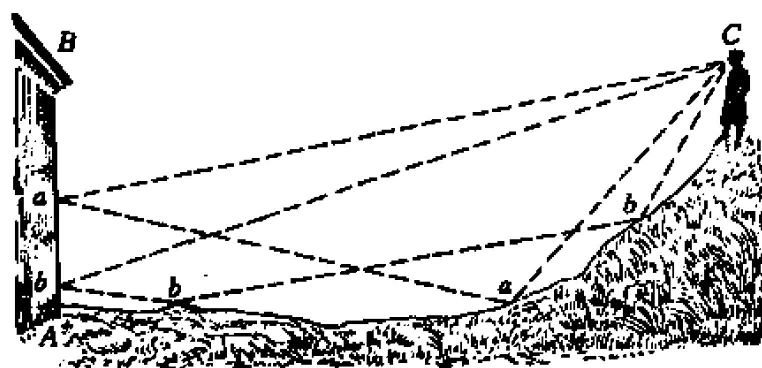


图 141　清楚的回声

清晰，起着像凹面镜一样的作用。相反，假如 C，B 两点之间的地面是凸起的，那么这回声就很微弱，甚至根本不会传到你的耳朵里；这样的地面会和凸面镜一样，把“声线”散射开去。

在不平坦的地面上寻找回声，是需要一定的技巧的。甚至已经找到了最合宜的地方，还得知道怎样把它“召唤”出来。首先，你不可以站在离障碍物太近的地方：应该让声音走过一段相当远的路——否则回声回来得太快，会跟原来发的声音汇合到一起。我们知道声音的速度是 340 米每秒，那么就不难了解，当我们站在离障碍物 85 米的地方，你应当在发出这声音以后半秒钟，听到这个回声。

虽然回声的产生是“由于一切声音在空旷的空间产生自己的反映”——但是并不是所有声音反映得同样清晰的。“野兽在森林里吼叫，或者是号角在吹，或者是雷声在轰鸣，或者是一个女孩子在土丘后面歌唱”，所得到的回声都各不相同。所发声音越尖锐、越断续，所得到的回声就越清晰。最好是用拍手来引起回声。人的声音引起的回声比较不清晰，特别是男子的声音，妇女和孩子的高音调可以得到清晰得多的回声。



声音代替量尺

知道了声音在空气里的传播速度，在某些情形下就可以用来测量不可接近的物体的距离。这件事情在儒勒·凡尔纳的《地心游记》小说里也有过描写。小说里的两位旅行家——教授和他的侄儿——在地下旅行的时候走散了。后来他们能够听到对方的声音，这时候两人之间曾经有过这么一段对话(这段故事是用侄儿的口吻叙述的)：

“叔叔！”我喊道。

“什么事，我的孩子？”一会儿之后，我听到了他的回答。

“首先我想知道，我们两个人离开得有多远？”

“这个容易！”

“你的表走得好吗？”

“好的。”

“请你把它拿在手里。喊一声我的名字，并且就在喊的时候，记着表上的秒数。我一听到你的喊声，就立刻重复一声我的名字，你就把听到我的声音的时刻记下。”

“好的。那时候从我发出声音到我听到你的声音这个时间的一半，就表示声音从我这里走到你那里所需要的时间了。你准备好了吗？”

“准备好了。”

“注意了！我喊你的名字了！”

我把耳朵贴着墙壁。一等“亚克谢立”[1]这个声

---

〔1〕亚克谢立是侄儿的名字。

音传到我的耳朵里，我立刻重复地喊了一声。

"40秒，"叔叔说，"因此，声音从你那里到我这里一共走了20秒。声音每秒钟大约走1/3公里，[1] 20秒钟大约走7公里。"

假如在这一段里所讲的内容你能够完全明白，那么你自己就会很容易地去解答同一类的问题了。

我在看到离得很远的火车头放出汽笛的白汽以后，过了一秒半钟，才听到了汽笛声。问：我离这火车有多远？

声音的镜子

树林，高院墙，大建筑物，高山，总之，一切反射回声的障碍物，都可以说是声音的镜子；这些东西反射声音的情形，跟平面镜反射光线的情形相同。

这种声音的镜子不但有平面的，还有曲面的。凹面的声音的镜子作用跟反射镜一样，会把"声线"聚集在它的焦点上。



图142　声音的凹面镜

你只要找两只盘子来，就可以做一个有趣的实验。请把一只盘子放在桌子上，把你的怀表用手拿在离这只盘底几厘米高的地方，拿另外一只盘子侧放在头旁边耳朵附近，像图142。

[1] 在地心的两个地点中间不见得会全是空气，很可能中间隔着岩石，而声音在岩石里的传播速度并不是1/3公里每秒，这一点小说的作者大概也是疏忽了。



假如表、耳朵和盘子的位置都选得正确(在几次试验以后就会成功)，你会听到表的滴答声仿佛是从头旁边的盘子上发出的一样。假如你把眼睛闭起来，这个错觉就会更加厉害，那时候，你就真的不可能单凭听觉来判断表究竟拿在哪一只手里——拿在左手还是右手里。

中世纪城堡的建筑师时常造出一些声音上的怪事，他们把半身人像安放在声音的凹面镜的焦点上，或者放在巧妙地隐藏



图 143　古代城堡里的声音的怪事——会说话的半身像
(这图是从 1560 年出版的一本书里复制出来的)

在墙壁里的传声管的一端。图 143 是从 16 世纪一本古书上复制出来的，那儿可以看到上面所说的那些异想天开的装置：拱形的天花板把经过传声管从外面送进来的声音送到石膏像的嘴上；暗装在建筑物里的很大传声筒把院子里的各种声音送到大厅里的半身人像旁边，等等。走进这种房间里的客人，会觉得云母石的半身像好像会说话、唱歌一般。

剧院大厅里的声音

时常到各种剧院和音乐厅去的人，一定都清楚地知道：有

些大厅里，演员的言语和音乐的声音可以在很远的地方听得明了清楚，但是在有一些大厅里，虽然坐在前排，也听得不大清楚。这种现象的原因，在一部谈声波和它的应用的书里有很好的说明：

> *在建筑物里发生的随便什么声音，会在声源发声完毕以后继续传一个相当长的时间；它在多次反射作用下，绕着整个建筑物传了好几次——但是在这同时，别的声音又接着发了出来，使听的人时常不可能把各个声音一个一个辨别清楚。例如，假定一个声音要继续存在3秒钟，又假定讲话的人每秒发出3个音节，那么，那相当于9个音节的声波就会一起在房间里行进，因而产生了一团糟的噪音，使得听众没法听懂讲话人要讲的意思。*
>
> *在这种情形，讲话的人只好一个字一个字分得非常清楚地讲下去，而且不要用太大的声音。但是一般的情形恰恰相反，讲话的人在这种情形下往往更提高了声音，这样使噪音更加增强了。*

还在不久以前，能够建筑出合于声学要求的剧院，认为是侥幸的事情的。现在呢，人们已经找到方法去消灭这种扰乱声音的现象(这现象叫做交混回响)。这本书不打算详细谈这个问题，因为这只有建筑师才感兴趣。我们只指出一点，就是，消灭交混回响现象的方法，主要是建造能够吸收剩余声音的墙壁。吸收声音最好的是打开的窗子(就像孔吸收光最好一样)；人们甚至把1平方米的打开的窗子采用来做吸收声音的计量单位。坐在剧院里的观众也很能够吸收声音，虽然他们的吸收能力要比打开的窗子小一半：一个人吸收的声音相当于0.5米打开的窗子。一位物理学家说过，“观众吸收讲演人的讲演词，所

谓‘吸收’可以照这个词的表面意义解释”，如果他这句话说得不错，那么，空虚的大厅对讲演的人是不利的，这句话也就可以照它的表面意义来解释。

反过来说，假如声音的吸收太强了，这也会使声音听不清楚的。第一，过度的吸收会把声音减弱，第二，会把交混回响的作用减少得太多，使得声音听起来仿佛断断续续，给人一种枯燥的感觉。因此，我们固然应该避免过度的交混回响，但是太短的交混回响也不好。那么交混回响究竟要有怎样的程度才合适，这对于各种大厅是不一样的，应该在设计每座大厅的时候来决定。

剧院里还有一个东西，从物理观点上看是很有趣的，这东西就是在台前提词用的台词厢。你可曾注意到所有剧院的台词厢都是同一形状的吗?这原因是，台词厢的本身等于一种声学仪器。台词厢的拱壁等于一个声音的凹面镜，它起着两种作用：阻止提词的人发出的声波传播到观众方向去，并把这些声波反射到舞台上。

从海底来的回声

人们有很长的一段时间，没有从回声得到一点好处，后来才想出一个方法，利用它来测量海洋的深度。这件发明是偶然得到的。1912 年，一只很大的游船“泰坦尼克”号跟冰山相撞沉没了，几乎全部乘客遭了难。为了保证航行的安全，人们想在浓雾里或者夜里行船的时候，利用回声来发现前进路上有没有冰山。这个方法实际上并没有成功，但是引出了另外一个想法：利用声音从海底的反射来测量海洋的深度。这个想法已经取得成功。

图 144 是这种装置的简图。在船的一侧的底舱里靠近船底的地方有一个弹药包，在燃烧的时候发出剧烈的声响。这声波穿过水层到了海底，反射以后的回声折回到水面上来，由装在舱底的灵敏的仪器接收下来。一只准确的时钟计量出了声音从发出到回声到达相隔的时间。我们已经知道了声音在水里的速度，就很容易算出反射面的距离，换句话说，就是测出了海洋的深度。

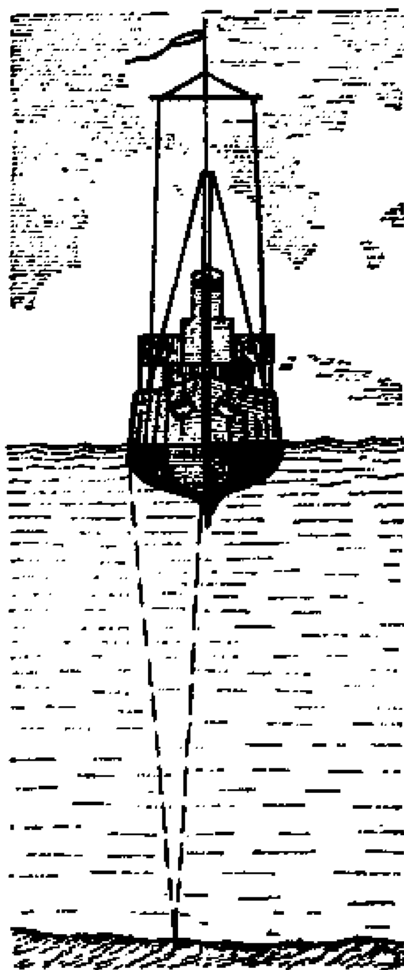


图 144　回声测深器作用简图

这种测量海洋深度的装置叫做回声测深器，在测量海洋深度的工作上起着极大的作用。应用从前的测深器，只能在船只不动的时候测量，而且要花许多时间。那系着测锤的绳要通过轮盘垂下去，而且垂下得相当慢(每分钟约 150 米)；把它从海底提出来也是这么慢。因此，要测量 3 公里的深度，用这个方法就得花 3 刻钟。如果采用回声测深器，同样的测深工作只要几秒钟就完成了，而且测量的时候轮船仍旧可以照常行驶，所得到的结果也比用测锤的方法可靠得多，精确得多。最新的测深工作所得到的误差不超过 1/4 米(这时候时间的测量要精确到误差不超过 1/3000 秒)。

如果说深海的深度的精确测量对于海洋学有重大意义，那么，在浅水的地方进行又快又精确可靠的测深工作，对于航海是有真正帮助的，这可以保证航行安全：由于回声测深器的帮助，船只就能够大胆而且很快地向岸靠近。

在现代的回声测深器里，已经不是用一般的声音，而是用

非常强的“超声波”，是人的耳朵听不到的声音，它的频率大约每秒几百万次。这样的声音是由放在很快的交变电场里的石英片(压电石英)的振动产生的。

昆虫的嗡嗡声

为什么昆虫在飞的时候时常会发出嗡嗡声来呢?它们大多数是没有发出这个声音的特殊器官的；这个嗡嗡声是只有在昆虫飞行的时候才听得到，原因是昆虫飞行的时候，每秒钟都要振动它的小翅膀几百次。振动着的翅膀事实上就是振动着的膜片，而我们知道，所有振动得足够频繁的膜片(每秒钟振动数超过16次的)，都会产生出一定高低的音调来。

现在你可以明白，人们是用什么方法知道各种昆虫飞行时候翅膀振动的次数的。这件事情很简单，只要从听觉上判定昆虫发出嗡嗡声的音调高低就行了——因为每一种音调都是跟一定的振动频率相当的。在“时间放大镜”(见第一章)的帮助之下，人们确定了各种昆虫的翅膀振动次数是几乎不变的；昆虫要调节它们的飞行，只是改变翅膀振动的大小——就是“振幅”——和翅膀的倾斜度；只在受到天冷的影响的时候才增加每秒钟振动翅膀的次数。正是因为这个缘故，昆虫在飞行的时候发出的音调总是不变的……

人们已经测定了，譬如说，苍蝇(飞的时候发出F调音)每秒钟振动翅膀352次。山蜂每秒钟振动翅膀220次。蜜蜂在空着身子飞的时候发出A调音，每秒钟振动翅膀440次，如果带着蜜飞行，翅膀每秒钟只振动330次(B调)。甲虫飞行时候发出的音调比较低，两翅振动得比较慢。相反的，蚊子每秒钟要振动翅膀500～600次。为了使大家对于上面这一些数目有比较

进一步的了解，让我来告诉你一个数目：飞机的螺旋桨，平均每秒钟只转 25 转。

听觉上的幻象

如果我们由于一个什么原因，认为一个轻微的声音不是从近处，而是从很远的地方传来的，那么，我们会感到这个声音听起来就好像响得多。我们时常可以碰到这种听觉上的幻象，只是不大注意罢了。

下面这个很有趣的例子，就是一位美国科学家威廉·詹姆士在他著的《心理学》中所描述的：

> 有一天深夜，我正静坐着看书，突然，从房子前面传来一阵可怕的响声，接着，响声停止了，一会儿又响起来。我跑到客厅去，想细听一下这个声音，但是没有再听到。我刚回到房里坐下，把书拿起来，那个可怕的声音又强烈地响起来了，就像风暴或者泛滥的河水快要到来一样。这个响声从四面八方传来。我被弄得极度不安，再次走到客厅去,那声响又没有了。
>
> 当我重新回到房里的时候，突然发现，这个声音原来是一只睡在地板上的小狗打鼾时候发出来的……
>
> 这里有趣的是，一找到响声的真正原因，不管怎么努力，原来的幻觉就再也不会重现了。

读者可能也会从自己日常生活中回想起同样的例子来。我就不止一次地碰到过这种情形。



蟋蟀在哪里叫

一个发出声音的物体在哪里，我们时常容易弄错的，不是它的距离，而是它的方向。

我们的耳朵能够很好地辨别枪声是从左边发出的还是从右边发出的(图 145)。但是假如这声源是在我们的正前方或者正后方，我们的耳朵就时常没有能力辨明声源的位置(图 146)：正前

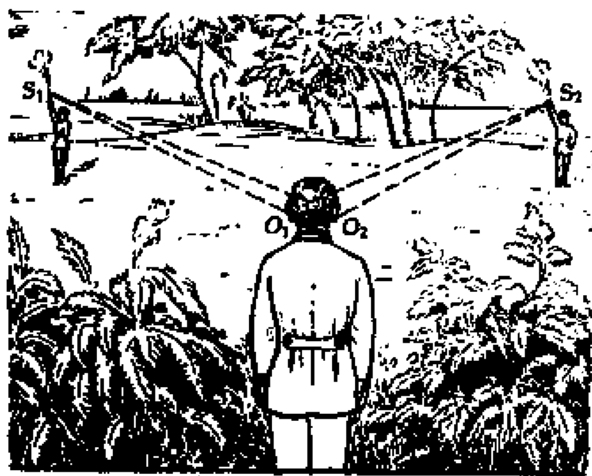


图 145　什么地方的枪声，左边还是右边

方放出的枪声，听起来时常像是在后面发出的一样。

对这种情形，我们只能够根据声音的强度辨别枪声的远近。

下面是能够使我们学到许多东西的一个实验。叫随便哪一位蒙住眼睛坐在房间中央，请他安静地坐着不动，也不要把头转动。然后，你拿两枚硬币敲响起来，你所站的位置要总是在他的正前方或者正后方。现在请他说出敲响硬币的地方。他的答案会奇怪得简直叫你不相信：声音发生在房间的这一角，他却会指着完全相反的一角！

假如你不是站在他的正前方或者正后方，那么错误就不会

这么严重。这是很容易了解的：现在他离得比较近的那只耳朵已经可以比较先听到这个声音，而且听到的声音也比较大，因此他能够判定声音是从哪里发出的。

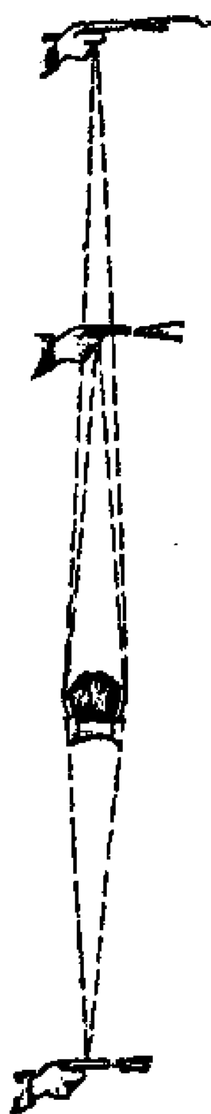


图 146　哪里发出的枪声

这个实验同时说明了为什么在草丛里很难找到蟋蟀的原因。蟋蟀的响亮声音从离你两步远的右边草丛里发出。你往那边看去，但是，什么也没有看到，而声音却已经变成从左边传来了。你把头转到那边去——但是声音又从第三个地点传来了。你的头向声音的方向转得越快，那位看不到的音乐家好像也跳得越机敏。事实上，这只蟋蟀却始终是在同一个地方；它的捉摸不到的“跳跃”，不过是你想象的结果，是听觉欺骗的结果罢了。你的错误就在于当你扭转头部的时候，恰好使蟋蟀的位置在你头部的正前方或者正后方。这样，我们就能知道为什么很容易弄错声音方向的原因：蟋蟀原来是在你的正前方，你却错误地认为它是在相反的方向上。

从这里可以得到一个实际的结论：假如你想知道蟋蟀的声音、杜鹃的歌声以及这一类远地方传来的声音从什么地方发出的，千万不要把面孔正对声音，而要相反地，把面孔侧对声音，让一个耳朵正对声音，即我们平常所说的“侧耳倾听”。

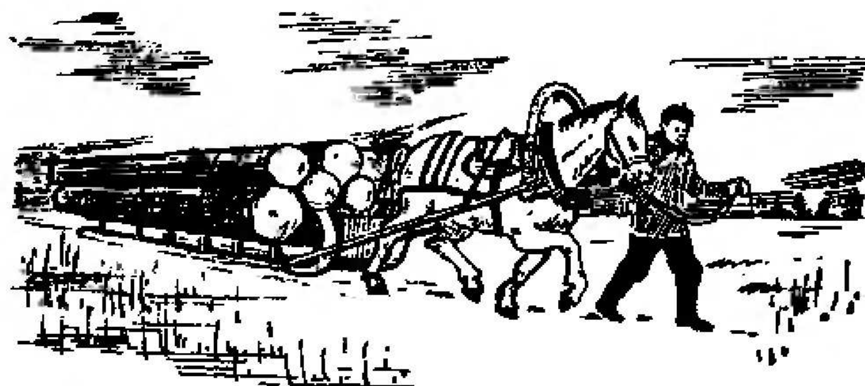


声音的怪事

当我们咀嚼烤干的面包片的时候，我们会听到很大的噪音，但是在我们旁边的朋友也正在大嚼同样的烤面包片，我们却听不到什么显著的声音。这位朋友是怎样避免发出噪音的呢?

原来，这种噪音只有自己的耳朵才听得到，你旁边的朋友是听不到的。人体头部的骨骼，跟一切坚韧的物体一样，非常容易传导声音，而声音在实体介质里，有时候会加强到惊人的程度。嚼烤面包片时候的碎裂声，经过空气传到别人的耳朵里，只听到轻微的噪音；但是那个破裂声假如经过头部骨骼传到自己的听觉神经，就要变成很大的噪音了。这儿还有一个同样性质的例子：把你的怀表圆环用牙齿咬起来，两只手掩紧两只耳朵，你会听到很重的打击声，滴答声给加强了许多倍!

贝多芬耳聋以后，据说就是用一根棒听取钢琴演奏的，他把棒的一端触在钢琴上，另一端咬在牙齿中间。许多内部听觉还完整的聋子，也都能够依着音乐的拍子跳舞，这是因为音乐的声音经过地板和他的骨骼传导过来的缘故。



11 力学的基本定律

最便宜的旅行法

17 世纪，法国有一位叫西拉诺·德·别尔热拉克的作家，写了一本讽刺小说，名叫《月国史话》(1652 年)，里面有一处谈到一件好像他本人曾经亲身经历过的奇事。有一次他做物理实验，竟莫名其妙地和他的玻璃瓶一起升到了空中。过了几小时，他才得重新降落到地面上。这时候可真叫他惊奇，他发觉自己已经不在本国法兰西，甚至也不在欧洲，却在北美洲的加拿大了！但是，这位法国作家对于自己这次出乎意外的横跨大西洋的飞行，却认为是完全自然的。他解释的理由是：在一个不由自主的旅行家离开地球表面的时候，我们这行星还是和从前一样在从西向东转；因此，他降落的时候，在自己的脚下已经不是法兰西，而是美洲大陆了。

看来，这是多么便宜而且简单的一种旅行方法啊！只要升到地球上空，哪怕只停留几分钟，就可以降落到西方很远的地方。用不着越洋过海、爬山渡河去作疲劳的旅行，只要悬在地

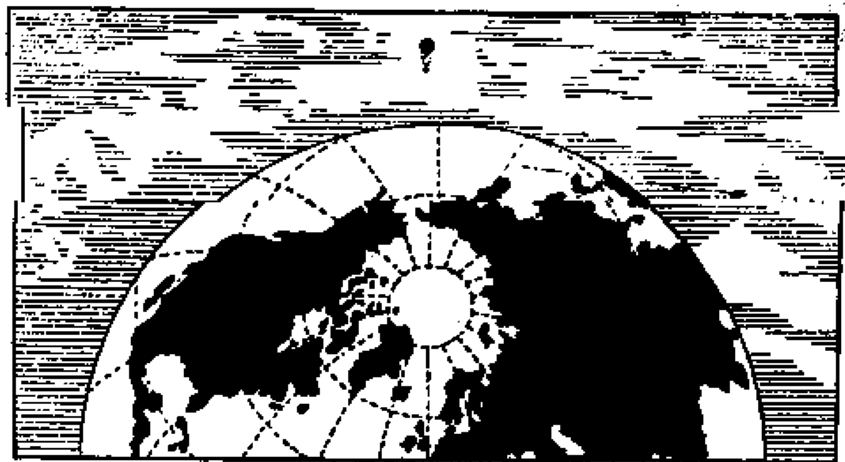


图 147　能不能从气球上望见地球在怎样转动(图上的地球和气球并没有照比例画)



球上空静静地等候着，到时候，地球自己就会把目的地送到旅行家的脚下来。

可惜这种奇异的方法，不过是一个幻想。首先，我们上升到空中以后，事实上并没有和地球脱离关系：我们仍然和它的大气外壳保持着联系，我们只是悬在那随着地球的自转而运动的地球大气里。空气，尤其是比较密实的下层空气，是带着在它里面的一切，如云、飞机、各种飞鸟和昆虫等等，跟着地球一起转动的。假使空气不跟着地球转的话，那么我们站在地球上就会经常觉得有大风了，并且这种风非常强烈，就是最猛烈的飓风也比它柔和。[1] 要知道，我们站着不动，让空气在我们身旁流过，或者反过来，空气不动，我们在空气里前进，是完全一样的；在这两种情况下，我们同样会感觉到有很大的风。摩托车运动员用 100 公里每小时的速度开着车子前进，即使在完全没有风的天气，他也要觉得有很大的逆风。

这是第一。第二，就算我们能够升到大气的最高层，或者就算地球外面没有这层空气外壳，这时候，这位法兰西讽刺小说家幻想出来的便宜旅行法，还是不切实际的。事实上，我们离开那旋转着的地球的表面以后，由于惯性的关系，还是依照原来的速度继续运动着；也就是说，我们还是用那在我们下边运动着的地球的速度继续运动着。所以在我们重新降落的时候，我们还是降落在原先出发的地方，就同我们在跑得飞快的火车里面向上跳，仍旧落在原处一样。不错，惯性会使我们沿着切线做直线运动，而我们脚下的地球却做着弧线运动；可是在极短的时间里，这是没有什么关系的。

---

〔1〕飓风的速度是 40 米每秒，144 公里每小时。而地球带着我们冲开空气前进，比如说在列宁格勒的纬度上，速度就达到 230 米每秒，也就是 828 公里每小时。

“地球，停下来”

英国作家威尔斯有过一篇幻想小说，谈到某一位办事员怎样创造奇迹。这个不大聪明的年轻人生来有一种奇特的本领，只要说出他想要什么，这种东西就会立刻出现。可是这种奇特的本领除了给他本人和别人带来不愉快以外，却什么好处也没有。读一下这个故事的结尾，对我们是有教育意义的。

在一次很长的夜宴完毕以后，这个奇异的办事员生怕到家的时候天已经亮了，就想使用自己的天赋才能，把黑夜延长一下。怎么办呢?应该命令所有的天体停止运动。这个奇人没有立刻决定做这件不太平凡的事情，但是他的朋友却怂恿他叫月亮停止运动。这时候，他就看着月亮，沉思地说：

> “叫月亮停住，我觉得它离我们太远了……你以为怎样?”
>
> 美迪格[1]却竭力劝他：“可是为什么不试一试呢?它当然不会停住，你只要叫地球停止转动就得了。我想，这大概对谁也不会有什么坏处吧!”
>
> “唔，”福铁林[2]说，“好，就让我来试一试。”
>
> 于是他就做出发命令的姿势，伸出双手严肃地喊道：
>
> “地球，停下来!不准再转!”
>
> 这句话还没有说完，他跟朋友们却已经用一分钟几十公里的速度飞入空中去了。
>
> 虽是这样，他还能继续思索。幸亏不到一秒钟，他

〔1〕美迪格是这位朋友的名字。
〔2〕福铁林是这位办事员的名字。



就想出并且说出了一个新的愿望，那是关于他自己的：

“无论怎么样，得让我活下去，别遭殃才好!”

不能不说他这个愿望提出得正是时候。几秒钟以后，他发现自己已经落在一处好像刚爆炸过的地面上，在他的周围，石块、倒坍的建筑物的碎片、各种金属制品接连不断地飞过去，幸亏都没有撞到他身上；飞过去的一条遭难的牛，落在地面上给撞得粉身碎骨。风用惊人的威力呼啸着，甚至使他不能抬起头来环顾周围的一切。

他用断续的声音高叫着：“真是莫名其妙，出了什么事啊?怎么会发起狂风来了呢?总该不是因为我做了什么事惹起来的吧。”

他在狂风里透过飘动着的衣襟的缝隙尽力向四周望了望以后，继续说道：

“天上似乎一切都还有秩序。月亮也在原处。可是所有别的呢……城市哪里去了!房屋和街道哪里去了?这风是从哪儿来的?我并没有呼风啊。”

福铁林试着要站起来，然而已完全不可能了，因此他就双手抓住石块和土堆向前爬。可是已经没有地方可去了，因为他从被风吹得蒙在头上的衣襟缝里尽力望出去，只见周围已经是一片废墟。

“宇宙间一定有什么东西遭到严重破坏了，”他想，“可是究竟是什么呢，却一点也不知道。”

事实上是什么都毁了。房屋没有了，树木没有了，任何生物没有了——什么都不见了。只有乱七八糟的废墟和各种各样的碎片四散在他附近，在尘埃遮天的狂风里勉强能看清它们的轮廓。

这个祸首当然一点也不明白这是怎么回事。可是这件事情的解释却非常简单：叫地球一下子停止转动，他没有想到还有惯性作用，惯性作用在圆周运动猛一停止

的时候，不可避免地要把地面上的一切抛出去。这就是为什么房屋、人、树木、牲畜——一切跟地球本身没有固定联系的东西，都要沿着地面的一条切线，用枪弹般的速度飞出去，后来一切又都落到地面上，并被撞得粉碎了。

可是福铁林也知道他造成的奇迹并不特别成功。因此，他对于奇迹发生了很深的厌恶，打算下决心不再创造什么奇迹了。可是，首先得把已经造成的灾害挽救一下。这场灾害也真不小。狂风刮得很凶，尘土像云一样遮蔽了月亮，远远还听见有洪水逼来的啸声；他在闪电的光辉下，还看到了一堵水墙，正在用惊人的速度向他躺着的地方冲来。

这时候他才下了决心，对着水高声喊叫：

"站住！一步也不许再前进！"然后又向雷、电和风，发出了同样的命令。

一切都平静了。

他于是蹲下来想。

"最好再也别闹这种乱子了，"他想过以后，说道，"第一，我就要说的几句话都应验了以后，让我失掉创造奇迹的能力吧，从今以后我要做个普通人了。奇迹是不需要的。这玩意儿太危险了。第二，让城市、人们、房屋和我自己，一切都恢复原来的样子。"

从飞机上送信

设想你是在一架在空中很快地飞着的飞机里。下面是熟地方。现在你就要飞过你朋友的住宅了。你突然想起，"最好能问



候他一下。”于是你很快在便条纸上写了几个字，把纸缚在一块石头上，等飞机刚飞到这所住宅上空的时候，让石头落下去。

当然，你满怀信心地认为这块石头会落在你那朋友的院子里。可是，虽然院子和住宅正在你下面，石头却并不往那里落!

如果留心看着这块石头从飞机上往下落，你就会看到一种奇怪的现象：石头在往下落，可是同时却仍旧在飞机下面，它好像顺着缚在飞机上的一条看不见的线在向下滑一样。这样，等石头到达地面的时候，它要落在离你瞄准的地方很远的前方了。

这里出现的还是那个妨碍着我们使用别尔热拉克建议的吸引人的旅行方法的惯性定律。当石头还在飞机里的时候，它是同飞机一起前进的。你让它落下去，可是在它离开飞机往下落的时候，并没有失掉原来的速度，因此，在它落下的同时，它还要向原来的方向继续前进。两种运动，一种是竖直的，一种是水平的，合了起来——结果，这块石头就始终留在飞机下面，沿着一条曲线往下飞(当然这只是在飞机本身并不改变飞行方向和速度的情况下)。这块石头的飞行，实际上就像按水平方向抛出去的物体，例如从一支水平的枪膛里射出去的枪弹，它走的路线总是一条弧线，最后到达地面。

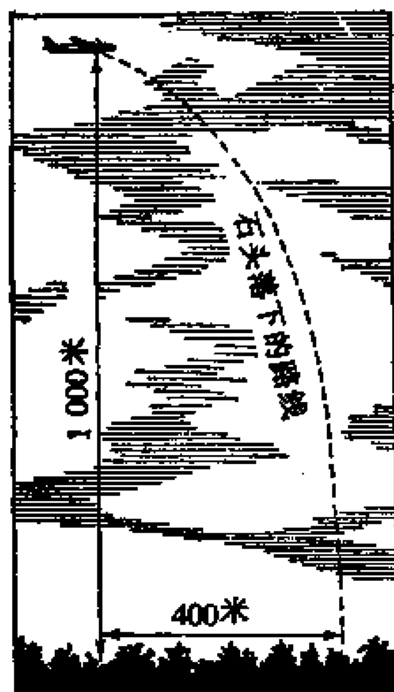


图 148　从正在飞行的飞机上落下的石头，不是竖直地，而是沿着一条曲线落下来的

不过需要指出，如果没有空气的阻力，上面所说的一切，当然是完全正确的。但是事实上，空气的阻力阻碍着石头的竖直运动和水平运动。因此，石头不会总是正在飞机下面，而要稍微落在它后面一些。

如果飞机飞得很高很快，石头偏离竖直线会很显著。在没有风的

天气，飞机在 1 000 米的高空用 100 公里每小时的速度飞行，从飞机上落下来的石头，一定会落在竖直落下地点的前面大约 400 米的地方(图 148)。

如果不把空气的阻力计算在内，这个计算并不复杂。由匀加速运动的公式 $s=\frac{1}{2}gt^2$，得 $t=\sqrt{\frac{2s}{g}}$。可知石头从 1000 米的高处落地的时间，应当是 $\sqrt{\frac{2\times1000}{9.8}}$ 也就是 14 秒。在这个时间里，它用 100 公里/小时也就是 $\frac{100000}{3600}$ 米/秒的速度在水平方向的移动是

$$\frac{100000}{3600}\times 14=390\text{米}$$

投　弹

从上面说的看来，空军里的投弹手要把炸弹投在指定的地方是多么的困难：他得考虑飞机的速度，考虑炸弹在空气里落下的条件，除此以外，还要考虑到风的速度。图 149 上画的是飞机投下的炸弹在各种条件下所走的不同路径。如果没有风，投下的炸弹就沿曲线 *AF* 飞行，理由上面已经讲过了。顺风的时候，炸弹要被吹向前面，沿曲线 *AG* 走。在不大的逆风里，如果上下层大气的风向是一样的，炸弹就要沿曲线 *AD* 落下；要是像平常那样，下层的风向同上层的相反(上层是逆风，下层是顺风)，那么，炸弹落下的曲线就要变成 *AE* 了。

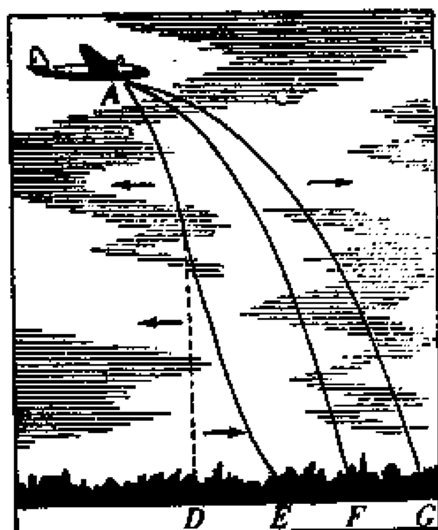


图 149　飞机上投下的炸弹所走的路径：
AF，在没有风的天气里；
AG，在顺风的时候；
AD，在逆风的时候；
AE，在上面逆风、下面顺风的时候

不要停车的铁道

如果你站在火车站的不动的月台上，有一列快车从月台旁边开过，这时候你要跳上车去，当然是不很容易的。可是请你想象一下：如果你脚下的月台也在移动，并且移动的速度和方向同火车一样，这时候你要上车还有困难吗？

一点困难也没有了。这时候你走上火车，就像走上一辆停着的火车一样平稳。只要你和火车是在同一个方向用同样的速度前进，那么对你来说，火车就等于是完全不动的。不错，车轮是在转，但是你会觉得它们是在老地方转。严格说来，我们通常看作不动的东西(例如停在火车站上的火车)，都和我们一起绕着地球的轴同时又绕着太阳在转。可是在实际上，我们一点儿也没有理会到这些运动，并且这些运动对我们一点儿也没有妨碍。

所以，我们完全可能建造出这样的火车站，使火车经过它的时候不停下来，仍旧照原来的速度开，而旅客们还是可以上车下车。

在展览会里往往采用这类设备，好让参观的人能够很快很方

便地欣赏陈列在大会场里的陈列品。会场两头的广场，用一条像无限轨道那样的铁道连在一起，参观的人可以在火车很快地开过的时候，随时随地上车下车。

这种有趣的构造见附图。在图 150 上，*A* 和 *B* 是会场两头的车站。在每个车站上，中间都有一块圆的不动的场子，场子的外圈围着一个大转盘。转盘外围有一圈链索，一节节的车厢可以挂在这链索上。现在让我们看转盘转动时候的情况。车厢绕着转盘开动的速度，同转盘外缘的速度一样；因此，人们可以毫无危险地从转盘走上或离开车厢。下车以后，参观的人就可以向转盘的中心走去，一直走到那块不动的场子上。从转盘的内缘跨上那块不动的地方已经没有困难了：因为在这里，圆的半径已经很小，所以它的圆周速度也就极小。[1] 到达里面那块不动的场子以后，参观的人就可以过桥走出车站去（图 151）。

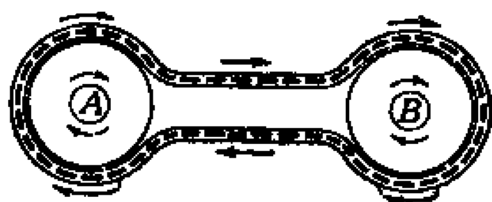


图 150　*A*、*B* 两站间的不要停车的铁道的构造。车站的构造见下图

火车不常停，可以节省许多时间和能量。举例来说，城市里的电车，大部分时间和差不多 2/3 的能量是消耗在电车离站时



图 151　不要停车的铁道的车站

〔1〕我们容易明白，转盘转动的时候，它的内缘各点比外缘各点要慢得多；因为在同样的时间里，内缘各点所走的圆周路线要短得多。



候的逐渐加快的运动和停车前的逐渐减慢的运动上的。[1]

火车站上即使不用特别的活动月台，也可以使旅客在火车开着的时候上车和下车。让我们来设想，有一列快车从一个普通的不动的车站上开过，我们希望它不停下来就在这里让旅客搭上车。可以让旅客先跳上停在并行轨道上的另一列火车里，开动这列火车，让它前进，渐渐把速度提高到跟快车一样。在两列火车并排前进的时候，就这两列车相互之间的关系说来，它们都好像停着不动。这时候，只要搭上跳板，把两列火车的车厢接起来，旅客们就可以从辅助车厢安稳地走上快车。这样一来，列车到站就不用停车了。

活动人行道

还有一种设备，也是根据这种相对运动的原理建造的，就是所谓“活动人行道”，不过这种设备直到目前为止，也还只有在展览会里可以看到。

这种设备的构造如图 152。你看，这里有 5 条环形的人行道，一条挨着一条套在一起；它们各有单独的机械来开动，速度各不相同。最外圈的那一条走得相当慢，速度只有 5 公里每小时，等于平常步行的速度，要走上这样慢慢爬行的人行道，显然并不困难。在这条里侧，同它并行的第二条人行道，速度是 10 公里每小时。如果从不动的街道直接跳上第二条人行道，当然是危险的，可是从第一条跨到这一条就不算什么了。事实上，对速度 5 公里每小时的第一条人行道来说，速度 10 公里每小时的第

〔1〕刹车时候能量的损失是可以避免的，只要在刹车时候改接车上的电动机，使它们像发电机那样工作，把电流还给电网；这样，电车开动时能量的支出就可以减低到原来的 30%。

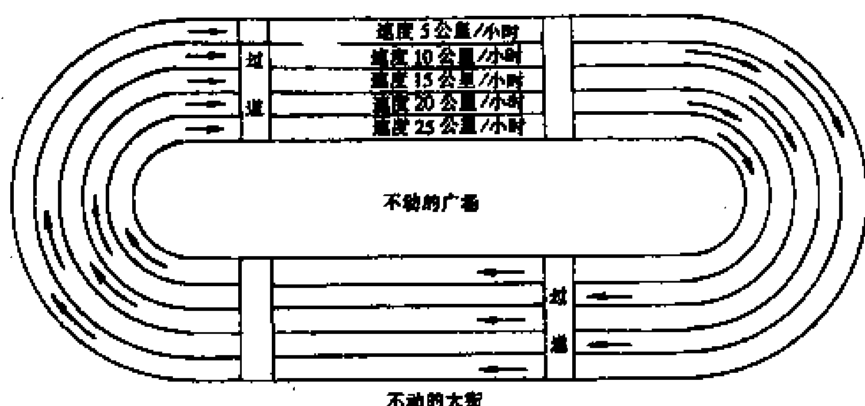


图152　活动人行道

二条人行道也不过是在做5公里每小时的运动；这就是说，从第一条跨到第二条，是和从地面跨到第一条一样容易的。第三条已经是用15公里每小时的速度前进了，可是从第二条跨上去，当然也不困难。从第三条跨到用20公里每小时的速度前进的第四条，以及最后从第四条跨到用25公里每小时的速度奔驰的第五条，也都一样容易。这第五条人行道就可以把旅客送到要去的地方，到了目的地，旅客又可以一条条地往外跨，他就可以走到不动的地面上。

一条难懂的定律

力学的三条基本定律里，大概要算第三条所谓作用和反作用定律最使人疑惑不解了。大家都知道这条定律，甚至在某种情况下也会正确地应用它，可是很少有人能够完全明了它的意义。读者当中也许有人是一下子就懂得它的——可是我得承认，我从初次和它相识起，过了10年才完全理解它。

我曾经和许多人讨论过这条定律，也曾经不止一次地看出，人们对这条定律的正确性的承认，都是有保留的。他们认为，这



定律对静止的物体说来，毫无疑问是正确的，但是不懂得怎样它应用到运动物体的相互作用上……这条定律说，作用永远等方向相反的反作用，这就是说，如果马拉车子，那么车子也用样大的力量往后拉马。可是这时候车子就应该停在原来地方不才对，为什么它还是向前走呢？这两个力量如果是相等的，为么它们不互相抵消呢？

一般人对于这条定律的怀疑就是这样。那么，这条定律是不靠的吗？不，定律毫无疑问是可靠的；只不过我们还没有正确理解它。两个力没有互相抵消掉，只是因为它们是加在不同物上的缘故：一个力加在车上，一个力加在马上。两个力是一样，没有错——可是，难道说一样大的力永远会产生一样大的作吗？难道说一样大的力能够使随便什么物体得到一样大的加速吗？难道说，力对物体的作用是和物体本身，和物体的“抵抗”的大小没有关系的吗？

如果想到了这些，那么，车子虽然在用同样大小的力量向后马，而马还能拉着车走的原因就很容易明白了。作用在车子上力和作用在马身上的力在每一瞬间都是相等的；但是，车有轮，可以自由移动位置，而马却坚定地立足在地面上，因此，车只好跟着马走。可以再想一想，如果车对马的动力不起反作，那么……不用马也就行了，用一个极小的力量也就能拉着车了。可是事实上，要克服车的反作用，还是非马不可。

如果把这条定律的通常所用的简短形式“作用等于反作用”成譬如说“作用力等于反作用力”，那么也许能使大家更容易解，也少产生些疑问。因为这里相等的只是力。至于作用（如像平常那样，把“力的作用”理解成物体的位置移动），因为力的物体不同，一般是不会相等的。

当北极的冰紧挤住“切留斯金”号船身的时候，它的舷也同用相等的力压在冰上。至于发生惨剧，那是因为强大的冰块抵了船壳的压力，没有被压碎；可是船身呢，虽然是钢做的，却



不是实心的，所以经受不住这种压力，到底被冰压坏了。

物体落下的时候，当然也服从作用等于反作用的定律，虽然这两方面的力不是一下子就看得出来的。苹果落到地上，是因为地球在吸引它；可是苹果也在用完全相等的力吸引地球。严格地说，苹果和地球是在彼此相向地落下，不过落下的速度，在苹果方面和在地球方面是大不相同的。两个同样大小的相互吸引力，使苹果得到了 10 米每二次方秒的加速度，而地球呢——它的质量比苹果大几倍，它得到的加速度也只有苹果得到的几分之一。地球的质量比苹果的大无数倍，因此，地球向苹果的移动便小到不能再小，实际上只能算作零。所以我们说苹果落到地上，而不说“苹果和地球彼此相向地落下”[1]，就是这个道理。

大力士斯维雅托哥尔是怎样死的

你知道一个大力士斯维雅托哥尔想举起地球来的民歌吗?阿基米德，如果传说可靠的话，也曾经准备做这件事情，要求只要能替他的杠杆找到一个支点。而斯维雅托哥尔呢，他有力气，却不用杠杆。他只想找一个可以抓住的东西，使他那有力的手有地方用力。“只要有地方用力，整个地球我都能举起来。”却也凑巧，这个大力士在地上找到了一个“小褡裢”，它搭得很牢，“不会松，不会转，又不会给拔出来”。

斯维雅托哥尔跳下马，
双手抓住小褡裢，
把小褡裢提得高过了膝盖，

〔1〕关于反作用定律，请参看我写的《趣味力学》(1)。



他就齐膝盖陷到地里面。
他苍白的脸上没有泪，却流着血。

斯维雅托哥尔陷在那里，再也起不来。
他的一生就此完结。

如果斯维雅托哥尔懂得作用和反作用定律的话，他也许就会想到，既然他的两脚支撑在地面上，那末，他用来提地球的极大的作用力就会引起同样大小的反作用力，这个反作用力就可以把他自己拉进地里去。

从这个民歌可以看出，在牛顿第一次刊行他的不朽著作《自然哲学的数学基础》(自然哲学就是物理学)前好几千年，人们已经不自觉地在应用反作用定律了。

没有支持的东西能够运动吗

走路的时候，我们是在用脚推开地板或地面；如果地板非常滑，或者是在冰上，我们的脚就没法推，也就不能行走了。机车行动的时候，是用它的“主动”轮在推着铁轨；在结冰的地方，为了使火车能够开动，有时候甚至使用特别的装置，在机车主动轮前面的铁轨上撒沙。在刚开始有铁道的时候，车轮和铁轨上都是有齿的，这正是因为人们认为车轮必须推开铁轨，火车才能前进。轮船是用螺旋推进器的叶子来推开水的。飞机是用螺旋桨来推开空气的。总之，物体在随便哪种介质里运动，都要靠这种介质来支持才行。要是物体外围没有什么支持的东西，能不能运动呢?

看来，要做这种运动，简直就像抓住自己头发想把自己提升上去一样，是不可能的运动。的确，物体不能只用内部力量使自



己整个向前运动，但是它可以使自己里面的某一部分物质向一方面前进，而另一部分同时向相反的方面前进。你看见过多次飞行的火箭，可是你想到过它为什么会飞吗?它恰恰就是一个明显的例子，可以用来说明我们现在提到的这种运动。

火箭为什么会飞

连研究过物理学的人，有时也会对火箭的飞行做出完全错误的解释。他们说，火箭所以会飞，是因为利用在它里面燃烧的火药所产生的气体来推开空气。从前的人对火箭的想法是这样的(火箭早就发明了)，现在还有许多人也是这样想。可是，如果叫火箭在没有空气的空间里飞，它不但不比在空气里飞得坏，反而会飞得更好。可见火箭运动的真正原因，完全是另一回事。

其实这里发生的情形，同开炮的时候炮弹向前飞去而炮身后坐的情形是完全一样的。你可以想一下手枪和各种火器在发射时候的“后坐力”!假使把大炮悬在空中不给它一个支持点，炮身在射击以后就会向后运动，它的速度同炮弹向前运动的速度的比，等于炮弹的重力同大炮的重力的比。因此，儒勒·凡尔纳的幻想小说《底朝天》里的主人公，甚至会想到利用大炮的强大后坐力来做一件大事——“把地轴扶正”。

火箭其实就是大炮，不过它射出的不是炮弹而是火药的气体。中国的轮转焰火能旋转着上升，也是这个道理。装在轮子上的一根火药管，当里面的火药着火的时候，就发生气体向一方向冲出，火药管和跟它连在一起的轮子就向相反的方向运动。从本质上来看，这也只是一种大家知道的物理仪器“西格纳尔”轮的变相罢了。



有一件有趣的事。在轮船发明以前，曾经有过一种机器船的设计，这也是根据同一原理想出来的。船尾装有强大的压水泵，能够把船里储存的水压向船外，因此这条小船就向前驶去，好像中学物理实验室里用来证明上面说的这条原理的浮在水面上的洋铁罐一样。这个设计(列姆齐提出来的)没有拿来实用过，可是它对轮船的发明却起了很大的作用，因为它向富尔敦暗示了发明轮船的可能性。

我们也知道，最早的蒸汽机是公元前 2 世纪的时候希罗制造的，他根据的就是这一个原理：汽锅 β (图 153)里的蒸汽通过管 $\varepsilon\varepsilon\eta$ 进到一个安在水平轴上的球里；然后从两个曲柄管冲出，就把管子向相反的方向推，使球开始转动。可惜，希罗式的蒸汽涡轮机在古代只能成一种有趣的玩具，因为奴隶劳动的代价低廉极了，

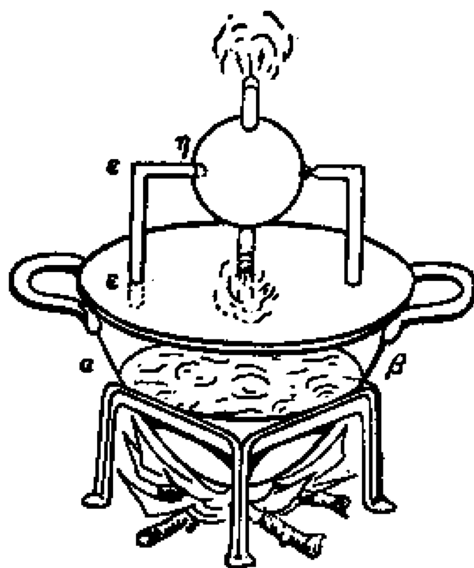


图 153　最古的蒸汽机(涡轮机)是公元前 2 世纪的时候希罗创造的

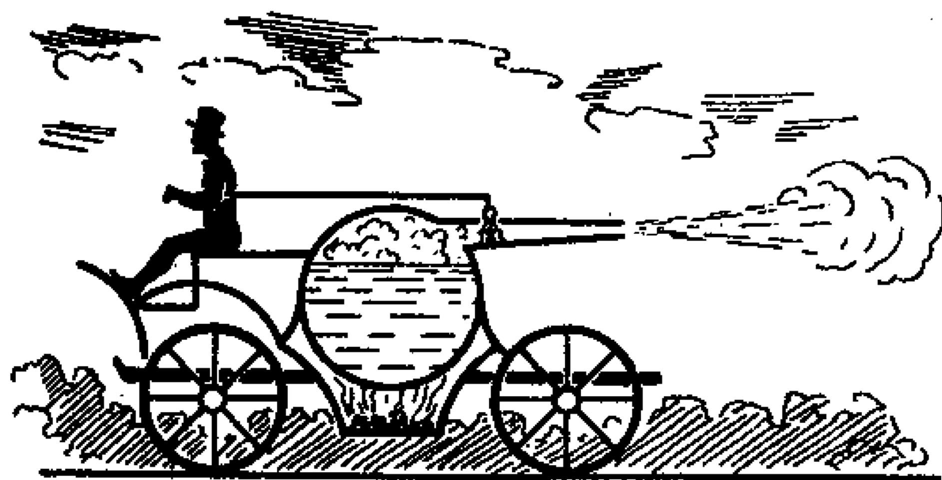


图 154　据说这是牛顿设计的蒸汽汽车



谁也不想使用机器。可是这个原理本身却没有被技术家抛弃。今天我们正在用它来建造反动式涡轮机。

还有一种也是根据这一个原理设计的最早的蒸汽汽车，是提出作用和反作用定律的牛顿设计的：从放在车轮上的汽锅里放出的蒸汽向一面冲出去，于是汽锅就被反作用力推着，使车轮慢慢前进(图 154)。

喷气式汽车就是牛顿的汽车的现代形式。

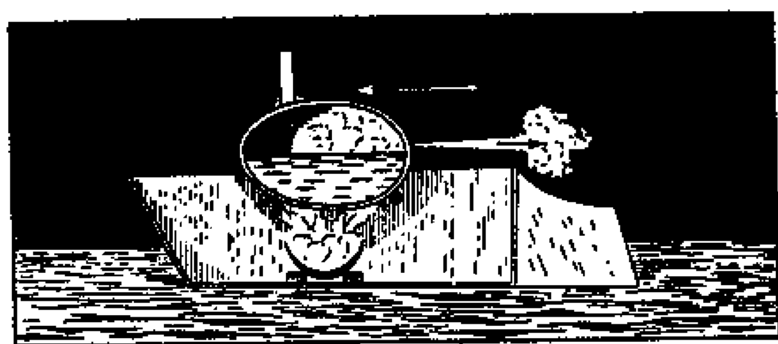


图 155　用纸和蛋壳制的玩具汽船。燃料是注入顶针里的酒精。从鸡蛋壳汽锅的小孔里冲出来的蒸汽，能使这只小汽船向相反的方向游动

如果有兴趣，可以照图 155 做一只纸制的小船，这只小船也跟牛顿的汽车极其相像。用一个空的蛋壳做汽锅，汽锅下面放一个顶针[1]，顶针里放一块浸了酒精的棉花，把棉花点着以后，蛋壳里的水便慢慢化成蒸汽；这时候，一股蒸汽就要向一面冲出，使整个小船向相反方向前进。不过，要做这种有教育意义的玩具，得有相当精巧的手艺。

〔1〕西式的顶针形状像个小酒杯。



乌贼是怎样活动的

你听说，有不少生物都用“抓住头发把自己提起来”的方法在水里行动，一定会感到很惊奇。

乌贼和大多数头足类软体动物都是用这种方法在水里活动



图 156 乌贼在游水

的：经过身体侧面的孔和前面的特别漏斗，它们把水吸入鳃腔，然后经过上面提到的漏斗用力把水压出体外。这样，按照反作用定律，它们就得到了相反的推力，使它们能从后面推动身体很快向前游去。乌贼能够使它们的漏斗管指向旁边或后方，然后用力从里面压出水来，使自己向随便什么方向前进。

水母的行动也是这样，它们收缩肌肉，使自己那钟形的身体下面排出水来，得到一种反方向的推力。蜻蜓的幼虫和别种水中动物在行动的时候，也都用同这相似的方法。知道了这些以后，难道我们还会说这样运动不可能吗？

乘火箭到星球上去

有什么比离开地球到无边无际的宇宙空间里去旅行——从地球飞向月球，从一个行星飞到另一个行星——更使人兴奋的吗?用这种题材写的幻想小说，已经不知道有多少种了!哪一种没有引起过我们漫游宇宙空间的幻想呢?伏尔泰在《小麦加》里，儒勒·凡尔纳在《月球旅行记》和《赫克特尔·雪尔瓦达克》里，威尔斯在《月球上的第一批人》里，此外还有许多别的作家，都曾经幻想过极有趣的宇宙旅行。

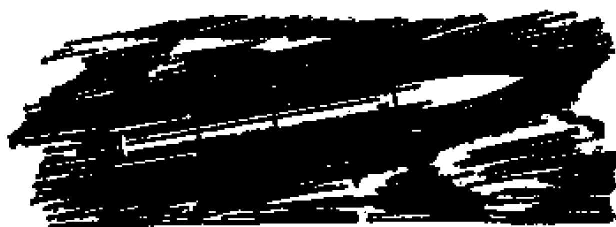


图 157　构造类似火箭的星际飞船

难道这种很久以来就幻想着的事情，真的就没有实现的可能吗?难道小说里描写得这样引人入胜、似乎可信的一切聪明的设计，事实上都是不能实现的吗?后面我们还要谈到关于星际旅行的一些理想设计。现在让我们先认识一下已故原苏联著名科学家齐奥尔科夫斯基提出的宇宙飞船的实际设计。

能不能乘着飞机上月球去呢?当然不能。飞机和飞艇所以能够运动，只是因为有空气支持着它们，把它们推开去。但是，地球跟月亮之间却是没有空气的。在宇宙空间里，没有任何介质可以支持星际飞船。所以必须设计出一种不用任何支持物就能运动和驾驶的飞行设备。

我们已经知道了类似炮弹的玩具——火箭。那么为什么不制造一个巨大的火箭，使里面有特别的，装得下人、食物、空气筒和各种必需品的房间呢?设想人们已经能够在火箭里带上大量燃



料，并且能够控制爆炸气体使之向随便哪一个方向冲出。那我们就有了一种真正可以驾驶的宇宙飞船，坐在里面可以驶向宇宙空间，飞上月球和各个行星里去了……坐在里面的人控制气体的爆炸力，就有可能逐渐加大星际飞船的速度，使速度的增加对他们没有危害。希望在某个行星上降落的时候，他们可以转过飞船的头，逐渐减小速度，就会慢慢降落。最后，他们还能用同样的方法飞回地球。

我们可以回想一下，在不久以前，航空家才做了他们那胆怯的初步试飞；而现在，飞机已经能够飞入高空，飞越高山、沙漠、大陆和海洋。那么再过二三十年，星际航行能不能同样地蓬勃发展起来呢?那时候，人们就要挣脱曾经把他们长时期拴在地球上的那条无形的锁链，而冲入广漠无边的宇宙空间去。[1]

〔1〕这些年在这方面已经走出了第一步，1969 年，美国发射了“阿波罗 11 号”，人类首次登上月球。



12 力、功、摩擦



关于天鹅、龙虾和梭鱼的问题

关于“天鹅、龙虾、梭鱼跟一车货物”的寓言，是大家都知道的。可是如果有人从力学的观点来研究这个寓言，就会看出寓言作者克雷洛夫所做的结论同我们所得的完全不同。

摆在我们面前的是力学上几个互成角度的力的合成问题。按照寓言，这个力的方向是：

……天鹅在冲向云霄，

龙虾在往后退，而梭鱼在向水里拉。

这就是说(图 158)，一个力——天鹅的拉力——向上，第二个力——梭鱼的拉力(OB)——向旁边，第三个力——龙虾的拉力(OC)——向后面。别忘了还有第四个力——货物的重力，它是竖直向下的。寓言说，“货车现在还在原处”，换句话说，就是加在货物上的几个力的合力等于零。

是这样吗?让我们看一看。冲向云霄的天鹅，不但不会妨碍龙虾和梭鱼的工作，甚至还帮着它们：天鹅的拉力向着重力的反方向，所以减小了车轮跟地面和跟车轴的摩擦，也就是减轻了，甚至完全抵消了货车的重力——要知道货车并不是很重的(寓言中有句话，“对它们说来，货车似乎是很轻的”)。为了简单起见，让我们假定货车的重力是被天鹅的拉力抵消了，那我们就会看到，剩下来的只有两个力：龙虾的拉力和梭鱼的拉力。这两个力的方向，寓言说，虾是往后退，而梭鱼是在向水里拉。不用说，水一定不在货车的前面而是在它的某一侧面(克雷洛夫的几个劳动者当然不打算把货车拉下水去)。这就是说，龙虾和梭鱼的力



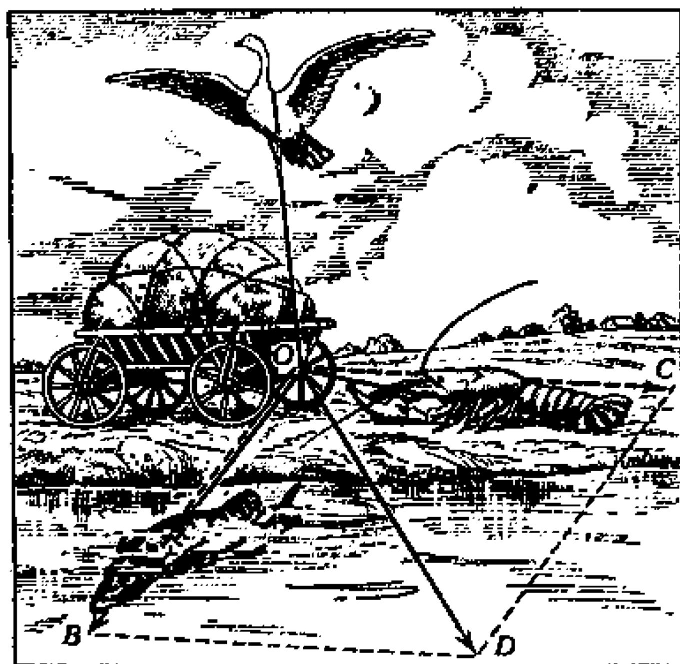


图 158　根据力学法则来解决克雷洛夫关于天鹅、龙虾和梭鱼的问题。合力（OD）应当把货车拉下河去

是互相成角度的，既然是这样，它们的合力就决不会等于零。

让我们按照力学的法则，用 OB 和 OC 这两个力做边来画一个平行四边形。四边形的对角线 OD 就代表着合力的方向和大小。很显然，这个合力应当能够移动货车。在货车的全部或部分重力因天鹅的拉力而减小的时候，就更加容易移动。另一个问题是：货车是向哪个方向——向前、向后，还是向旁边——移动的？这就要看这几个力的相互关系和它们所成角度的大小了。

读者如果对力的合成和分解有些实际经验的话，就很容易看出：即使天鹅的拉力不能抵消货车的重力，货车也不会停在原处不动。只有在一种条件下，这三个力的作用才能使货车不动。这条件就是车轮跟车轴和地面的摩擦力比合力大。但是这跟寓言的内容不合，因为“对它们说来，货车似乎是很轻的”。

这样看来，无论在哪一种情况下，克雷洛夫都不能肯定说“货车一点也没动”，“货车现在还在原处”。不过，这并没有影

响这个著名寓言的思想性。

和克雷洛夫的看法相反

我们刚才看到了克雷洛夫的处世箴言："同志之间如不能意见一致，就将一事无成。"但这在力学上并不都是适用的。几个指向不同方向的力，还是能够产生一定的效果的。

克雷洛夫曾经称赞过蚂蚁是模范工作者。但是很少有人知道，这些勤奋的工作者蚂蚁，正是按照这位寓言作者所嘲笑的方式协同工作的。它们的工作，一般说来，所以还能顺利进行，也是由于力的合成的规律。你如果在蚂蚁工作的时候，仔细地观察它们一下，很快就会相信，它们之间只是看来好像是在协作：事实上，每一只蚂蚁都在自管自地工作，根本没有想到要帮助同伴。请看一位动物学家所描写的蚂蚁的工作吧：

> 如果有几十只蚂蚁在平坦的地面上拉一个挺大的捕获物，那么，所有的蚂蚁都在一样地用力，从外表看来，它们是协力工作着。可是当这个捕获物——譬如说是条毛虫——遇到一个障碍物（草根或小石）而不能向

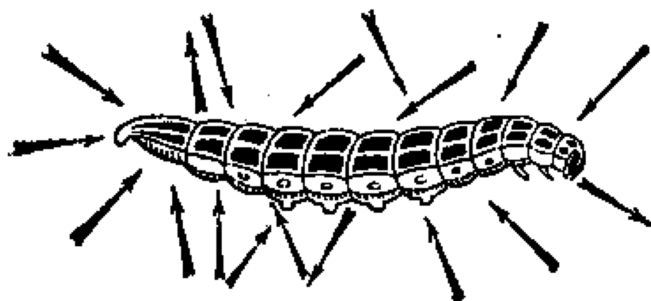


图 159　蚂蚁是怎样拉它们的捕获物的。箭头所指的是各只蚂蚁用力的方向



前拉，得绕着弯走的时候，就可以明显地看出，每一只蚂蚁都各管各而不是和同伴协同地来越过这个障碍物的（图 159 和图 160)。一只蚂蚁向右拉，另一只向左拉；一只蚂蚁向前推，另一只向后拖。它们更换着位置咬着毛虫的身体，每一只蚂蚁都照着自己的意思推或拉。有时候会有这样的情形：4 只蚂蚁推着毛虫朝一个方向前进，6 只蚂蚁朝另一个方向前进，这些力合起来，结果毛虫就不顾 4 只蚂蚁的反作用，而朝着 6 只蚂蚁推的方向前进了。

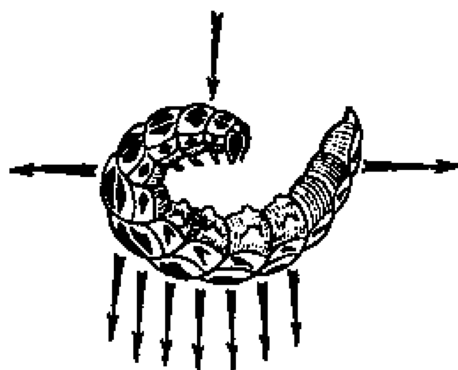


图 160　蚂蚁是怎样拉毛虫的

让我们再用一个很好的例子来说明蚁群中的这种假合作。图 161 画着一块正方形的干酪和咬着这块干酪的 25 只蚂蚁。干酪慢慢地沿着箭头 *A* 所指的方向移动。我们当然可以认为，前面一排蚂蚁是在拉，后面一排是在向前推，两旁的蚂蚁在帮着前后排蚂蚁。可是实际并不是这样，这也不难证明。用小刀把后面那排蚂蚁全部拨开，这时候干酪就会向前移动得更快。原来后面 11 只蚂蚁并不是在向前推而是在向后拉。每一只蚂蚁都竭力在朝后退，想把干酪拖到穴里去。可见后排的蚂蚁不但没有帮助前排，反而在全力阻碍它们，抵消它们的力。搬运这块干酪，其实有 4 只蚂蚁就够了；可是由于动作不一

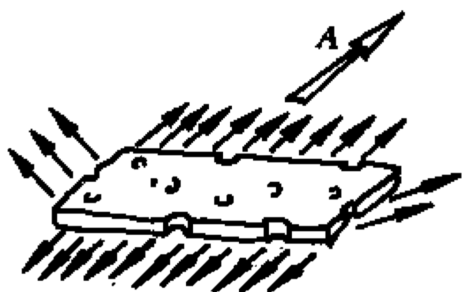


图 161　一群蚂蚁怎样把一块干酪沿着箭头 *A* 所指的方向，拖向蚁穴

致，25只蚂蚁才把这块干酪搬进穴里去。

值得惊异的是，蚂蚁的这种协力工作的特征，马克·吐温早就指出过。他曾经说过一个故事，故事里讲到两只蚂蚁，有一只找到了一条蚱蜢的腿。他说："它们各自咬住腿的一端，用全力朝相反的方向拉。两只蚂蚁都看出似乎有点不对头，却不明白到底是为了什么。于是它们就发生争吵，并且打起架来……后来它们和解了，重新开始这个毫无意义的协力工作。可是这只在打架的时候受了伤的同伴却成了一个累赘：它不肯放弃这个捕获物，便吊在它上面。那只健壮的蚂蚁用尽全力才把食物连同伤伴拖进洞穴里。"……马克·吐温于是取笑地提出了一个完全正确的批评意见说："只有在光会做不可靠结论的没有经验的博物学家眼里，蚂蚁才是好的工作者。"

蛋壳容易破碎吗

《死魂灵》里那个深谋远虑的吉法·摩基维支曾在好几个哲学问题上绞过脑汁，当中有这样的一个问题："哼，如果像是生蛋的，那蛋壳应该不至于厚到没有什么炮弹打得碎吧！唉，唉，现在是到了发明一种新火器的时候了。"

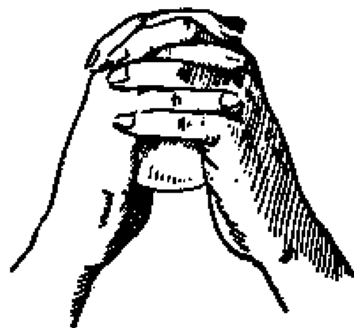


图162　用这种方法压破鸡蛋，要用很大力气

果戈里的这位哲学家，如果知道普通的蛋壳虽然很薄，却也不是什么脆弱的东西，他一定会大吃一惊的。把蛋放在两手的掌心之间，用力挤压它的两端，是不是很容易把它压碎呢？在这种情况下要压碎蛋



壳，非用很大的力气不可(图162)。[1]

蛋壳所以特别坚固，完全因为它的形状是凸出的。各种穹隆和拱门所以都很坚固，也是由于同样的道理。

图 163 的窗顶上有一个小型石拱。重力 S(也就是窗顶上面那部分砖墙的重力)向下施着压力，压在拱门中心那块楔形石头 M 上，这里用箭头 A 表示着。但是这块石头由于是楔形的，所以不能向下移动；它只能压在相邻两块石头上。这时候力 A 可以按照平行四边形的规则分解成两个力，像箭头 C 和 B 表示的那样；这两个力被相邻两边石块的阻力平衡了，而这两块石块又被挤在旁边的石块中间。因此，从外面压在拱门上的力就不会把拱门压坏。可是如果从里面向它用力，那就比较容易把它破坏了，因为石块的楔形虽然能够阻止它下落，却不能阻止它上升。



图 163　拱门所以坚固的原因

蛋壳也是这样的拱门，不过这个拱门是整块的，不是由一块一块的东西叠成的。蛋壳虽然很脆，但是在受到外来压力的时候，却不那么容易碎，就是这个道理。我们可以把一张相当重的桌子的 4 条腿，放在 4 个生鸡蛋上，结果蛋壳也不会破(为了使鸡蛋站稳并且增大受压的面积，需要用石膏把鸡蛋的两头加宽。石膏是容易黏附在石灰质的蛋壳上的)。

现在你们就可以理解，为什么母鸡不必害怕自己身体的重力会压破蛋壳；同时又可以懂得为什么弱小的鸡雏想要脱离天然囚笼的时候，却只要用小嘴在里面啄几下蛋壳，就不难出来了。

侧着茶匙敲蛋壳，很容易把它敲碎，因此，我们就料想不

---

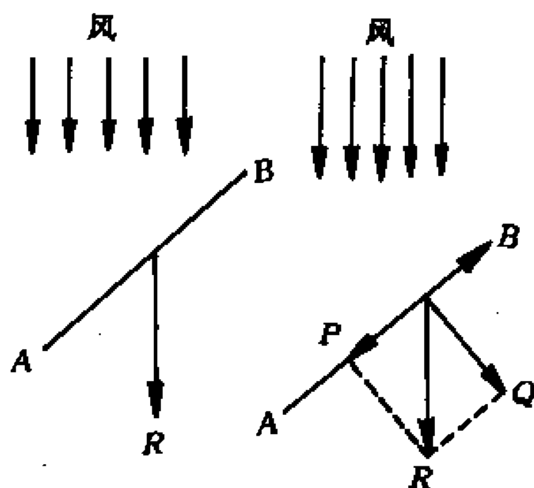
〔1〕这个试验做起来相当危险，碎蛋壳会刺人手里，所以要小心。

到，蛋壳在天然条件下承受压力是多么的坚固，大自然用来保护蛋壳里发育着的小生物的盔甲，是多么的坚固。

电灯泡看来好像很脆弱，实际上却极坚固，这同蛋壳很坚固是同样的道理。然而电灯泡的坚固性还要惊人，因为我们知道有许多灯泡(真空的，不是充气的)几乎完全是空的，里面没有什么物质用来抵抗灯泡外面空气的压力。空气对电灯泡的压力并不小。直径 10 厘米的灯泡所受的压力，就在 75 千克以上(相当于一个人的体重)。实验指出：真空灯泡甚至还能经受住 2.5 倍这么大的压力。

帆船逆风前进

很难想象帆船怎样能够逆着风前进。水手的确会告诉你们，正顶着风驾驶帆船是不可能的，帆船只能在跟风的方向成锐角的时候前进。可是这个锐角很小——大约只有直角的 1/4，大约是 22°——不管是正顶着风或者成 22° 的角度，看来是同样难以理解的。



可是实际上，这两种情形不是没有区别的。我们现在来说明帆船是怎样跟风向成小角度逆着风前进的。首先，让我们看风一般是怎样对船帆起作用的，也就是说，当风吹在帆上的时候，它把帆往哪里推。你也许会

图 164　风总是依垂直帆

这样想，风总是



不是这样。无论风向哪里吹，它总产生一个垂直帆面的力，这个力推动着船帆。且让我们假定风向就是图 164 箭头所指的方向。AB 线代表帆。因为风力是平均分布在全部帆面上的，所以我们可以用 R 来代表风的压力，它作用在帆的中心。把这力分解成两个：跟帆面垂直的力 Q 和跟帆面平行的力 P(图 164 右)。力 P 不能推动帆，因为风跟帆的摩擦太小了。剩下的力 Q 依着垂直帆面的方向推动着帆。

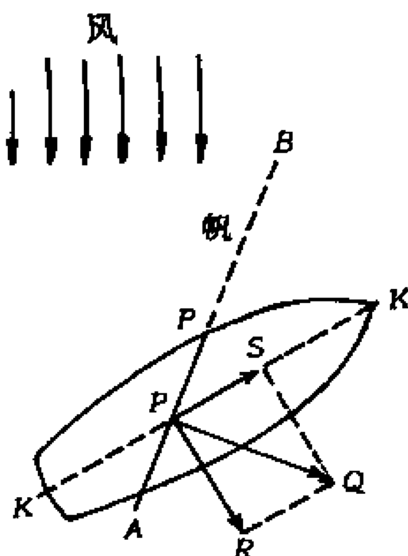


图 165　帆船怎样能够逆着风前进

懂得了这点，就容易懂得为什么帆船能够在跟风向成锐角的情况下逆着风前进了。让我们用 KK 线(图 165)代表船的龙骨线。风按箭头所表示的方向成锐角吹向这条线。AB 线代表帆面，我们把帆转到这样的位置，使帆面刚好平分龙骨的方向和风的方向之间的那只角。现在看图 165 里的力的分解。风对帆的压力，我们用力 Q 来表示，这个力，我们知道应当是跟帆面垂直的。把这个力分解成两个力：使力 R 垂直龙骨线，力 S 顺着龙骨线指向前面。因为船朝力 R 的方向运动的时候，是要遇到水的强大的阻力的(帆船的龙骨在水里很深)，所以力 R 几乎全部被抵消了。剩下的只是指向前面的力 S 在推动船，因而，船是跟风向成着一个角度在前进，好像在逆风里一样。[1] 这种运动通常



图 166　帆船左右迂回着前进

〔1〕不难证明，在帆面平分龙骨的方向和风的方向之间的那只角的时候，力 S 的数值最大。

总采取“之”字形路线，像图 166 里的那样。水手们把这种行船法叫做“抢风行船”。

阿基米德能举起地球吗

“给我一个支点，我就能举起地球。”相传这是古代发现杠杆原理的力学家阿基米德说的话。我们在波卢塔克的书里读到：“有一次，阿基米德写了一封信给叙拉古国王希伦，他同这位国王既是亲戚，又是朋友。信里说，一定大小的力可以移动任何重量[1]。他喜欢引用有力的证明，补充说：如果还有另一个地球的话，他就能到上面去，把我们的地球移动。”

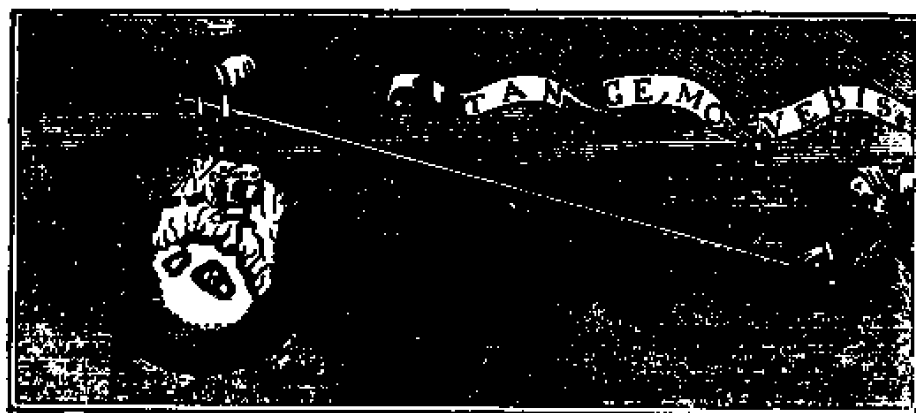


图 167 “阿基米德用杠杆举起地球”
(选自 1780 年出版的一本书里的一幅木刻)

阿基米德知道，如果利用杠杆，就能用一个最小的力，把不论怎样重的东西举起来：只要把这个力放在杠杆的长臂上，而让短臂对重物起作用。因此，他又想到，如果用力压一根非常长的杠杆臂，他的手就可以举起质量等于地球的重物[2]。

[1] 在物理学中，重量概念已取消，应为重力。

[2] “举起地球”这句话，我们指的是，在地球表面上举起一个质量等于地球的重物。



然而如果这个古代伟大力学家知道地球的质量是多么大，他也许就不会这样夸口了。让我们设想阿基米德真的找到了另一个地球做支点，再设想他也做成了一根够长的杠杆。你知道他得用多少时间才能把质量等于地球的一个重物，哪怕只举起1厘米呢?至少要30万亿年!

地球的质量天文学家是知道的。质量这样大的物体，如果把它拿到地球上来称的话，它的重力大约是：

6 000 000 000 000 000 000 000吨

如果一个人只能直接举起60千克的重物，那么他要“举起地球”，就得把自己的手放在一根这样长的杠杆上，它的长臂应当等于它的短臂的

100 000 000 000 000 000 000 000倍

简单地计算一下就可以知道，在短臂的那一头举高1厘米，就得把长臂这一头在宇宙空间里画一个大弧形，弧的长度大约是

1 000 000 000 000 000 000公里

这就是说，阿基米德如果要把地球举起1厘米，他那扶着杠杆的手就得移动大到这样不可想象的一个距离!那么他要用多少时间才能做完这件事呢?如果我们认为阿基米德能在1秒钟里把60千克的重物举高1米，那么，他要把地球举起1厘米，就得用去

1 000 000 000 000 000 000 000秒

即30万亿年!可见阿基米德就是用一辈子时间按着杠杆，也不能把地球举起极小的一段距离。

不管这位天才的发明家怎样聪明，他也没法显著地缩短这段时间的。“力学的黄金律”告诉我们，任何一种机器，如果在力上占了便宜，在位置移动的距离上，也就是在时间上一定要吃亏。即使阿基米德的手能够运动得和自然界最大的速度——光速(300 000公里每秒)———样快，他也只能在做了十几万年的工作以后，才能把地球举起1厘米。

儒勒·凡尔纳的大力士和欧拉的公式

你记得儒勒·凡尔纳书里的竞技大力士马蒂夫吗?“头大身高，胸膛像铁匠的风囊，腿像粗壮的木柱，胳膊像起重机，拳头像铁锤……”这位大力士的功劳在《马蒂斯·桑多尔夫》这部小说里叙述得很多，可是使读者印象最深的，大概是他用手拉住一条正在下水的船“特拉波科罗”号这件事。

关于这件事，小说的作者是这样告诉我们的：

已经移去了在两旁撑住船身的支持物，船准备下水了。只要把缆索解开，船就会滑下去。已经有五六个木工在船的龙骨底下忙着。观众满怀着好奇心注视着这件工作。这时候，却有一只快艇绕过岸边凸出的地方，出现在人们的眼前。原来这只快艇要进港口，必须经过“特拉波科罗”号准备下水的船坞前面。所以，一听见快艇发出信号，大船上的人为了避免发生意外，就停止了解缆下水的操作，让快艇先过去。假使这两条船，一条横着，另一条用极高的速度冲过去，快艇一定会被撞沉的。

工人们停止了捶击。所有的眼睛全都注视着这只华丽的船。船上的白色篷帆在斜阳下像镀了金一样。快艇很快就出现在船坞的正前面。船坞上成千的人都出神地看着它。突然听到一声惊呼,“特拉波科罗”号正当快艇的右舷对着它的时候，开始摇摆着滑下去了。两条船就要相撞了。已经没有时间、没有方法能够防止这场惨祸了。“特拉波科罗”号很快地斜着向下面滑去……船头上



卷起了因摩擦而起的白雾，船尾已经没入了水。[1]

突然出现了一个人，他抓住了挂在“特拉波科罗”号前部的缆索，用力地拉，几乎把身子弯得接近了地面。不到1分钟，他已经把缆索绕在钉在地里的铁桩上。他冒着被摔死的危险，用超人的气力，用手拉住缆索大约有40秒钟。最后，缆索断了。可是这40秒钟时间已经很足够：“特拉波科罗”号进水以后，只轻微地擦了一下快艇，就向前驶了开去。

快艇已经脱了险。至于这个使这件发生得很快的意外事件没有造成惨祸的人——当时甚至别人来不及帮助他——就是马蒂夫。

假使小说的作者听到说，这样的功劳并不需要一个像马蒂夫那样的“力大如虎”的巨人，而是每一个机智的人都能干的话，那他一定会非常惊奇。

力学告诉我们，缠在桩上的绳索，在滑动的时候，摩擦力可以达到极大的程度。绳索绕的圈数越多，摩擦力也就越大。摩擦力增长的规律是：如果圈数按照算术级数加多，摩擦力就按照几何级数增长。所以就是一个小孩子，只要能把绳索在一个不动的辘轳上绕三四圈，然后抓住绳头，他的力量就能平衡一个极大的重物。在河边的轮船码头上，常常有一些少年，就用这个方法使载着几百个乘客的轮船靠码头。原来在这里帮助他们的，并不是他们异常的臂力，而是绳和桩子之间的摩擦力。

18世纪，著名数学家欧拉曾经确定了摩擦力跟绳索绕在桩子上的圈数之间的关系。我现在把欧拉的有用的公式引在下面，给那些不怕简洁的代数语言的读者参考：

$$F = fe^{k\alpha}$$

〔1〕船下水的时候是船尾向前的。

在这个公式里，f 代表我们所用的力，F 代表我们所要对抗的力。e 代表数 2.718……(自然对数的底)，k 代表绳和桩子之间的摩擦系数。α 代表绕转角，也就是绳索绕成的弧的长度跟弧的半径的比。

把这个公式应用在儒勒·凡尔纳的故事里，所得的结果非常使人吃惊。这里，力 F 是沿着船坞滑下去的船对缆索的拉力。从小说里我们知道，船重 50 吨。假定船坞的坡度是 1/10，那么，作用在缆索上的就不是船的全重，而是全重的 1/10，也就是 5 吨或 5 000 千克。

再说，把 k——缆索和铁桩之间的摩擦系数——的数值算做 1/3。α 的数值是不难计算的。如果我们假定马蒂夫曾经把缆索绕桩 3 圈。这时候：

$$\alpha = \frac{3 \times 2\pi r}{r} = 6\pi$$

把这些数值代进欧拉的公式，就可以得到：

$$5000 = f \times 2.72^{6\pi \times \frac{1}{3}} = f \times 2.72^{2\pi}$$

未知数 f(就是需要的人力)可以用对数求出来：

$$\log 5000 = \log f + 2\pi \log 2.72$$

得到

$$f = 9.3 \text{ 千克} \approx 93 \text{ 牛}$$

因此，这个大力士只要用 93 牛顿的力就可以把缆索拉住，立下这次大功了!

你别以为这个数值——93 牛——不过是理论上的，实际需要的一定比这大得多。恰恰相反，这个数对我们说来已经太大了：古时候用来系船的是麻绳和木桩，在这两种东西之间，摩擦系数 k 比上面所用的数值更大，所以所需要的力[illegible]

笑。只要绳索够牢，吃得住拉力，[illegible]



结为什么能打得牢

在日常生活里，我们毫无疑义常常在享受欧拉公式所指出的利益。譬如打结。我们不就是把一条绳索的一端当做桩子，而让这根绳的其余部分缚在上面吗?各种各样的结——普通结、“水手结”、“纽带结”、“蝴蝶结”等等——所以能打得牢，完全是由于摩擦的作用。由于绳索围着自己缠绕着，像绳索围着支架缠绕着一样，所以摩擦力增大了许多倍。研究一下结里的许多曲折，就不难相信这一点。曲折越多，或是绳子围着自己缠绕的圈数越多，它的绕转角就越大，结也打得越牢。

缝衣工人钉纽扣，也常常在不知不觉中使用着这个方法。他把线头绕许多转，然后把线扯断。这样，只要线是坚韧的，纽扣就不会掉下来。这里所利用的还是我们已经知道的那条规律:线的圈数照算术级数加多的时候,纽扣的牢固程度就照几何级数增长。

如果没有摩擦，我们甚至连纽扣都没法使用：线在纽扣的重力下会自己松开，使纽扣脱落。

假如没有了摩擦

你看，在我们的周围，有各种各样的摩擦现象，这种现象有时非常出人意料。有时甚至连我们想不到的地方，也会出现极重要的摩擦现象。假如摩擦在世界上突然消灭了的话，许多普通现象都会完全按照另一种方式进行。

法国物理学家希洛姆对于摩擦现象曾经有过生动的描写：

我们有时候走上了结着冰的路。为了使身体不至跌倒，我们得用多少力气；为了站稳，又得做多少可笑的动作！这就不得不使我们承认，我们平时所走的路面有多么宝贵的性质，由于这种性质，我们才不必特别用力，就能保持平衡。当我们骑着自行车在很滑的路上滑倒的时候，或是马在柏油路上滑倒的时候，我们也会产生同样的思想。研究了类似的现象以后，我们就可以看出摩擦带给我们的后果了。工程师竭力在设法除掉机器上的摩擦，并且得到了很好的成绩。在应用力学里，常常把摩擦说成是最不好的现象。这当然是对的，可是也只有在几个狭窄的领域里才能算是对的。至于在别的情况下，我们还应当感谢摩擦：它使我们能够毫不提心吊胆地走路、坐定和工作；使书和墨水瓶不会跌落在地板上；使桌子不会自己滑向墙角；使钢笔不会从手里滑掉。

摩擦是一种非常普遍的现象。除了很少几种特别情况以外，我们用不着去找它，它自己就会来帮我们的忙。

摩擦能够促进稳定。木工刨平地板，目的是使桌子和椅子放在哪里就留在哪里。只要不是在正在摇晃的轮船里，放在桌子上的杯盘，用不着我们特别照顾，就会不动地留在桌子上。

如果我们设想已经完全没有摩擦了，这时候任何物体，不论是大石块或是小沙粒，就再也不能相互支持了。所有的东西都要滑着，滚着，直到铺成一个平面为止。如果没有摩擦，地球就像流体一样，变成了一个一点高低都没有的圆球了。

我们还可以补充说，没有了摩擦，铁钉和螺钉会从墙上滑出来，我们的手也不能拿东西，任何建筑物都不可能建造起来，起



了旋风就永远不会平息。我们会不断地听到发出的声音的回声，因为它从墙壁上反射回来，一点也没有被削弱。

每一次地面上的冻冰，都使我们清楚地看出摩擦的重要性。遇到街上结冰的时候，我们会弄得毫无办法，并且随时都有滑倒的危险。下面是从报上摘下来的几段消息(1927 年 12 月)：

“伦敦 21 日消息，由于地面结了冰，伦敦的街车和电车行动都发生困难。大约有 1 400 人摔坏了手脚等等，被送入医院。”

“在海德公园附近，3 辆汽车跟两辆电车相撞。由于汽油爆炸，车辆全部被烧毁。”

“巴黎 21 日消息，巴黎城和近郊，由于街道结冰，发生了许多不幸事件……”

可是在冰上摩擦力极小这一点，在技术上也可以利用。普通的雪橇就是例子。更好的例子是那用来把树木从伐木的地方运输到铁道或浮送站去的所谓冰路。在这种平滑的冰路上，用两匹马可以拉动装着 70 吨木材的雪橇(图 168)。





图 168　上，冰路上满载木材的雪橇，两匹马能够拉动 70 吨。
下，冰路：*A*，车辙；*B*，滑木；*C*，压紧了的雪；*D*，路上的土基

“切留斯金”号失事的物理原因

根据以上所说，可不要立刻得出结论，认为冰上的摩擦力不管在什么情况下都微不足道。有时候，即使在接近 0 摄氏度的时候，冰上的摩擦力也往往很大。近年来，原苏联破冰船的工作人员已经仔细地研究了北极海上的冰加在轮船钢壳上的摩擦力。

这种摩擦力似乎出人意料的大，并不比铁跟铁之间的摩擦力小。冰对新船的钢壳的摩擦系数是0.2。

为了明白这个数字对于在冰块之间航行的船有多大的意义，可以研究一下图169。在这个图里，画着在冰块的压力下，船舷 MN 所受到的各个力的方向。冰的压力 P 分解成两个力：跟船舷垂直的力 R 和跟船舷相切的力 F。P 和 R 之间的角等于船舷对竖直线的倾斜角 α。冰对船舷的摩擦力 Q 等于力 R 乘摩擦系数0.2，也就是 $Q=0.2R$。如果摩擦力 Q 比 F 小，力 F 就会把压在船身上的冰推到水里去；这时候冰就会沿着船舷滑动，并不会损害这船。如果力 Q 比 F 大，摩擦就妨碍着冰块的滑动，使冰块长时间压在船舷上，就要把船舷压坏。



图169　在冰上失事的"切留斯金"号轮船。右下，在冰的压力下，作用在船舷 MN 上的几个力

那么，在什么时候 $Q<F$ 呢？很容易看出，$F=R\cdot \mathrm{tg}\alpha$，因此 $Q<R\cdot \mathrm{tg}\alpha$。又因为 $Q=0.2R$，所以不等式 $Q<F$ 又可以变成：

$$0.2R<R\cdot \mathrm{tg}\alpha \text{ 或 } \mathrm{tg}\alpha>0.2$$

从三角函数表里可以查出，正切函数是0.2的角是11度。这就是说，在 $\alpha>11°$ 的时候，$Q<F$。根据上面所说的，就可以确定船舷对竖直线的倾斜度应该是多少，才能保证船在冰块中间安全航行。这个倾斜度应该不比11度小。

现在让我们看"切留斯金"号是怎样沉没的。"切留斯金"号实际是一艘轮船，不是破冰船。它在北海的全部航路上都航行



得很安全，但是在白令海峡却被冰块挤破了。

冰把“切留斯金”号带到了遥远的北方，并且把它毁了(在1934年2月)。大家都知道，船上的水手在冰上等待了两个月，然后由飞行员把他们救了出来。

下面是这次失事的经过：

“坚固的金属船身不是一下子就被压坏的，”远征队队长施米特在无线电里报告说。“我们看到冰块怎样压在船舷上，以及露在冰块上面的船壳的铁板怎样向外臌起来并且弯曲了。冰块不断地向船进攻，这种进攻虽然很慢，却是没法防御的。臌起的船壳的铁板沿着铆缝裂了开来，铆钉噼噼啪啪地飞走了。转瞬间，轮船的左舷从前舱到甲板的末梢完全撕裂了……”

读了上面这一段话以后，读者应当可以了解那次出事的物理原因了。

从这里也得出了一个实际的结论：在建造航行在冰里的船舶的时候，一定要使船舷有适当的倾斜度，也就是倾斜度应该不比11度小。

自己会平衡的木棒

把一根光滑的木棒像图170那样放在分开的两手的食指上。现在相向移动两个手指，直到合并在一起为止。非常奇怪，两个手指碰在一起的时候，木棒还保持着平衡，并没有掉下来。你可以把这个实验重复做几次，并且每次变换手指一开始放的位置，可是结果总是一样：木棒最后总是平衡着。如果不用木棒，而是用画图的尺、有杖头的手杖、打弹子的棒、擦地板的刷子，也能得到同样的结果。

这种出人意料的结果是怎样得到的呢？



图 170　用尺做的实验。上面是实验结束时的情况

首先应当明白：木棒平衡在合并在一起的两个手指上的时候，两个手指显然是在木棒的重心下面(如果从重心引出的一条竖直线能够通过支持物的范围里，那么这物体就在平衡状态中)。

在两个手指分开的时候，离木棒重心近的那个手指，负重比较大。压力大，摩擦力也大，离重心近的那个手指一定会比离重心远的手指受到更大的摩擦力。因此离重心近的手指就不在木棒下面滑动；滑动的总是那个离重心远的手指。一旦滑动的那个手指比不滑动的那一个更接近重心的时候，就换了一个手指滑动了。经过几次这样的交换，两个手指就并在一起。因为每次只有一个离重心比较远的手指在移动位置，所以两个手指最后碰在一起的地方，必然是在木棒重心的下面。

在结束这个实验以前，让我们用擦地板的刷子(图 171，上)再做一次，并且同时提出这样一个问题：如果在两个手指碰在一起的地方把刷子切成两段，再把它们各放在天平的一头如图 171 下，那么，哪一头会比较重些——是柄的那一头，还是刷子那一头？

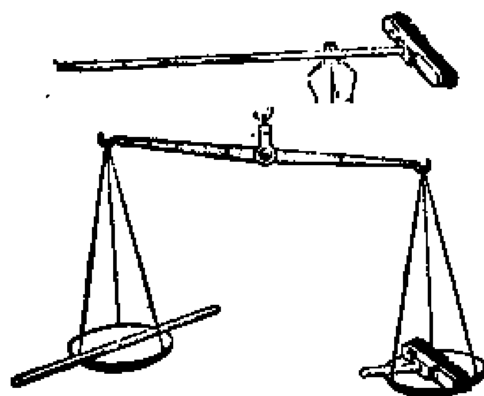


图 171　用擦地板刷子做的同一个实验。哪一头比较重些

看来，刷子的两部分既然能在手指上平衡，那么在天平上也应当能够平衡。可是事实上，刷



子的那一头要比较重些。这又是什么道理呢?原来刷子平衡在手指上的时候，两部分的重力是加在一根杠杆的长短不等的两臂上的，而在天平上，这两部分重力是加在一条等臂的杠杆的两端的。

我们还可以置备一些棒，它们重心的位置各不相同，把这些棒在重心地方切成长短不同的两段。把每根棒的两部分放在天平上,你一定会非常惊奇,原来短的一段总比长的一段要重些。



13 圆周运动

陀螺旋转的时候为什么不会倒

在小时候曾经玩过陀螺的成千上万个人里面，恐怕没有多少人能够正确地回答这个问题，为什么一个直立着转甚至歪斜着转的陀螺会出乎意料地不倒呢?是什么力量把它维持在这种好像很不稳定的状态呢?难道它能不受重力的作用吗?

原来，这里有一种极有趣的力的相互作用。陀螺的原理很不简单，这里不打算深入研究。这里只谈一谈旋转着的陀螺所以能够不倒的基本原因。



图 172 为什么陀螺不会倒

图 172 是一个照着箭头所指的方向旋转着的陀螺。请注意它边上写着 A 字的那一部分，和在它对面写着 B 字的那一部分。A 的部分在离开你，而 B 的部分在向着你转过来。现在再看，当你把陀螺的轴向你自己这一面侧倒的时候，这两部分会起什么样的运动。你这样推它，就是使 A 的部分的运动向上斜，B 的部分的运动向下斜；使这两部分都得到一种跟自己本来的运动成直角的推动。可是，陀螺在很快旋转的时候，它的圆周速度非常大，而你推它的时候所给它的那个速度却很小。一个小速度和一个大速度结合而成的速度，自然跟圆周的大速度相差不大。所以陀螺的运动几乎没有改变。陀螺好像抵抗着一切想把它推倒的力。同时陀螺越重和转得越快，就越能顽强地抵抗推倒它的力。这就是陀螺能够不倒的原因。

这个解释，在本质上同惯性定律有直接关系。陀螺上的每一个点，都在一个跟旋转轴垂直的平面里沿着一个圆周转。按照惯



性定律，每一个点随时都竭力想使自己沿着圆周的一条切线离开圆周。可是所有的切线都同圆周本身在同一个平面上。因此，每一个点在运动的时候，都竭力想使自己始终留在跟旋转轴垂直的那个平面上。由此可见，在陀螺上所有跟旋转轴垂直的那些平面，也竭力在维持自己在空间的位置。这就是说，跟所有这些平面垂直的那旋转轴本身，也竭力在维持自己的方向。

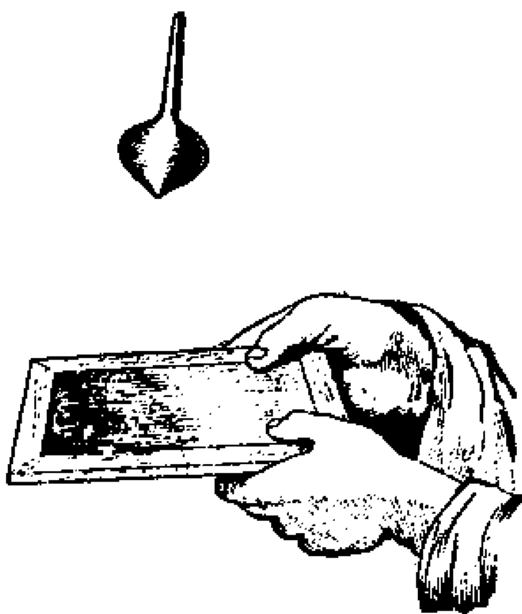


图 173　把旋转着的陀螺抛向空中，它还能使自己的轴保持原来的方向

我们不准备研究陀螺在外力作用下所发生的一切运动。这需要做很多解释，未免会枯燥无味。我只想解释一下，一切旋转物体所以能够使它们的旋转轴的方向保持不变，原因在哪里。

旋转物体的这种性质正被现代技术广泛地利用着。在现代轮船和飞机上装置的各种回转仪，像罗盘、稳定器等，都是根据陀螺原理造成的。旋转的作用保证了炮弹和枪弹飞行的稳定性，也可以用来保证人造卫星、宇宙火箭等在真空中运动的稳定性。陀螺似乎只是一种简单的玩具，谁知它竟有这么多的用途！

魔　术

魔术里许多使人吃惊的场面，也是根据旋转物体能够使旋转轴保持原来方向的原理演出的。约翰·培里教授写过一本有趣的

书，叫做《旋转着的陀螺》，让我摘录几段介绍给大家。

有一次我选做了几种自己的试验……我竭力想使听众感到兴趣，就对他们说，如果你想把一个圆环抛出去刚好落在预先指定的地方，你就应该使圆环得到一种旋转的运动。如果你想把一顶帽子扔出去能够让别

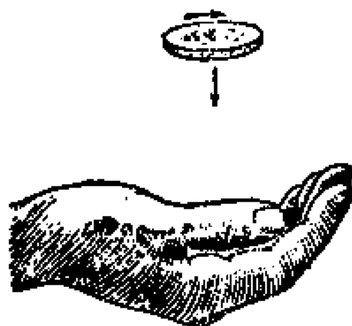


图 174　旋转着的钱币下落的情况



图 175　不旋转的钱币下落的情况

人用手杖接住，你也得这样做。原来在改变旋转物体的轴的方向的时候，它一定会产生反抗作用的。接下去我又向听众讲，如果把炮膛的里面磨光，炮就会瞄不准。因此现在都做来复线炮膛，这就是说，在炮膛里面刻着螺纹线，使炮弹在火药的爆炸力下通过炮膛的时候，得到一种旋转的运动。这样，炮弹离开炮口以后，就正确地做着一定的旋转运动前进。

我在那次讲演里能够做到的只有这些，因为我自己既不会掷帽子，也不会耍盘子。可是在我讲完以后，有两位魔术家走上台来，他们演出了几套戏法。这两个艺人的每个表演都是我刚才所讲的那些定律最好的实际应用。他们互相抛掷旋转着的帽子、盘子、



桶箍、伞……一个魔术家把许多刀子抛入空中，落下的时候把它们接住，又极准确地向上抛。观众们刚听过关于这些现象的解释，所以都欢呼起来，表示满意。他们都看到魔术家旋转了每把刀子，然后把它们抛上去；因为只有这样，才能够准确地知道刀子会取怎样的位置回到手里来。

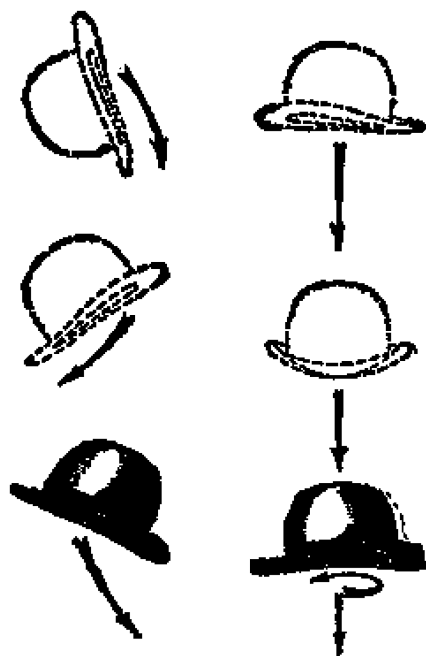


图 176　如果抛帽子的时候，同时使它依着自己的轴旋转，就更容易接住它

哥伦布的问题的新解决

哥伦布解决自己提出的有名的问题——怎样把鸡蛋竖起来——的方法真是简单极了：只是把蛋壳打破。[1]

这个问题这样解决，其实是不正确的。哥伦布打破蛋壳，就是改变了它的形状，也就是说，他竖的已经不是鸡蛋，而是别的物体了。要知道这个问题的全部要点就在蛋的形状上；改变了它的形状，就是等于用另一种物体代替了鸡蛋。所以哥伦布提出的

---

〔1〕应当指出，虽然一直来有哥伦布竖鸡蛋的传说，但是这并没有历史根据。摩尔瓦把很久以前别人因为完全不同的动机做过的事，硬加在这位著名航海家身上，做这件事的是意大利建筑家布鲁涅勒斯奇(1377 ～ 1446)，他是佛罗伦萨教堂的巨大圆屋顶的建造者(我的圆屋顶这样坚固，就好像竖在自己尖端上的鸡蛋一样)。

方法，并没有解决鸡蛋的竖立问题。

我们如果利用陀螺的原理，却能解决这个问题，同时又一点也不改变鸡蛋的形状。这只要使鸡蛋依着自己的长轴做旋转运动就可以了；这样，就可以让它的钝的一端向下，甚至尖的一端向下，直立一会而不倒下去。图 177 画着这个动作的做法：用手指旋转鸡蛋，放开手，鸡蛋还会竖着旋转一会。这个问题这样才算是真的解决了。

做这个试验，一定要用煮熟的鸡蛋。这一点限制同哥伦布问题里的条件并没有矛盾。哥伦布提出问题以后，立刻就从餐桌上拿起一个鸡蛋，餐桌上的鸡蛋当然不会是生的。我们未必能使生鸡蛋立着转，因为生鸡蛋里面是液体，它会阻止鸡蛋的旋转。顺便说说，许多家庭主妇都知道这个简单的方法可以用来区别生鸡蛋和熟鸡蛋。

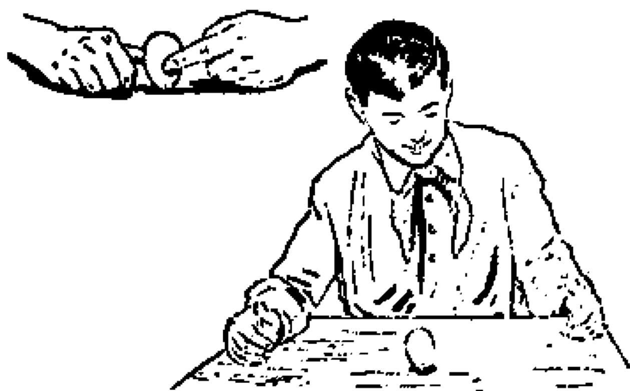


图 177　哥伦布的问题解决了：鸡蛋旋转着竖起来了

重力"消失"了

"把盛水的器皿甩着转的时候，里面的水不会泼出来；甚至把这个器皿转得底朝天，水也不会泼下来。因为旋转运动阻止着水泼出来。"这是二千年前亚里士多德写的几句话。图 178 画的就是这个试验：盛水的桶转得足够快的时候，即使你把桶转得桶底朝天，像图上所画的那样，桶里的水也不会泼下来。毫无疑义，



许多人都曾经做过这种试验。

这种现象平时都把它解释成由于“离心力”作用的关系。离心力是一种想象的力，它好像是加在物体上的，物体受了它的作用，总想远离旋转轴。这种力其实并不存在：物体所以要远离旋转轴，不过是惯性的一种表现，而所有由于惯性的运动，都是不必用力就可以实现的。在科学里，离心力的意思不是别的，只是旋转着的物体拉紧缚住它的线或是压在它的曲线轨道上的实在的力。这种力不是加在运动着的物体上的，而是加在阻止物体做直线运动的障碍物——线、转弯地方的铁轨等——上面的。

让我们抛弃掉那种意义不明确的离心力的概念，来研究水桶旋转时候所产生的现象的原因。我们可以先向自己提出这样一个问题：如果在桶壁上开一个孔，冲出来的那股水要向哪个方向运动？如果没有重力，这股水在惯性作用下，会沿着圆周 *AB* 的一条切线 *AK* 冲出去(图 178)。可是重力会强迫这股水落下来，形成一条曲线(抛物线 *AP*)。如果圆周速度够大，这条曲线就会落在圆周 *AB* 的外面。所以这股水告诉我们，如果不是桶阻碍着，在桶转的时候水会走什么样的路线。现在已经很明白，水根本不会竖直向下落，因此也就不会从桶里泼出来。水只有在一种情况下会从桶里泼出来，就是桶口朝着旋转的方向。

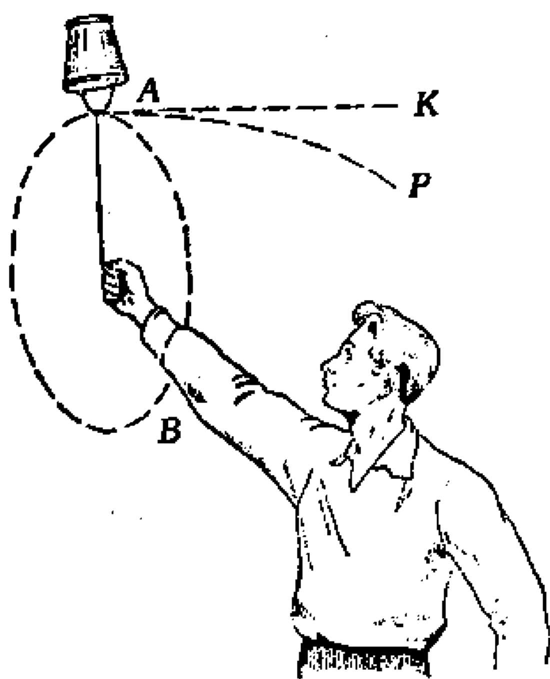


图 178　为什么水桶旋转时，水不会流出来

现在让我们来计算一下，在这个试验里水桶要转多快，水才不会向下泼。这个速度应当是：旋

转的水桶的向心加速度要不比重力加速度小。因为只有这样，才会使水冲出来的时候所走的路线落在水桶所画的圆周的外面，而桶不管转到哪里，水也不会从桶里泼出来。计算向心加速度 a 的公式是：

$$a=\frac{v^2}{R}$$

在这里，v 是圆周速度，R 是圆形路线的半径。在地球表面上的重力加速度 $g=9.8$ 米/秒^2，因此我们就有了一个不等式：

$$\frac{v^2}{R}\geqslant 9.8$$

假设 R 等于 70 厘米，那么，

$$\frac{v^2}{0.7}\geqslant 9.8$$

所以

$$v\geqslant\sqrt{0.7\times 9.8}$$
$$v\geqslant 2.6\text{ 米/秒}$$

很容易算出，要得到这样大的圆周速度，只要我们拿绳的手每秒钟大约转三分之二圈就够了。这样的旋转速度是完全可以做到的，所以这个试验能毫不困难地做成功。

在容器依着水平轴转的时候，液体会压在容器的壁上。这种性质在技术上已经利用在所谓离心浇铸上。这里主要的是：不均匀的液体会按照它们的密度成层地分开来。比较重的成分会落在离旋转轴远的地方，比较轻的成分会落在离轴近的地方。因为这样，含在熔化的金属里会在铸件里造成气泡的气体，就从金属里分离出来，跑到铸件里面的空处。用这种方法铸成的铸件比较密实，并且不含气泡。离心浇铸法比普通的压铸法成本低，并且不需要复杂的设备。



你也可以做伽利略

有许多城市为爱好强烈刺激的人预备了一种极别致的娱乐，叫做“魔术秋千”。我没有玩过这种秋千，所以只能从一本科学游戏集里抄下来一段描写它的文字：

在离地面很高的地方，有一根很坚固的横贯屋子的梁，梁上挂着秋千。大家在上面坐定以后，工作人员就关上门，撤去进屋子的跳板。这时候他宣布，他马上要让玩秋千的游客有机会去做一次短期的空中旅行了。说完以后，他就轻轻地推动秋千。然后自己就坐在后面，像驾马车的人坐在马车后面一样，或者干脆走出这间屋子。

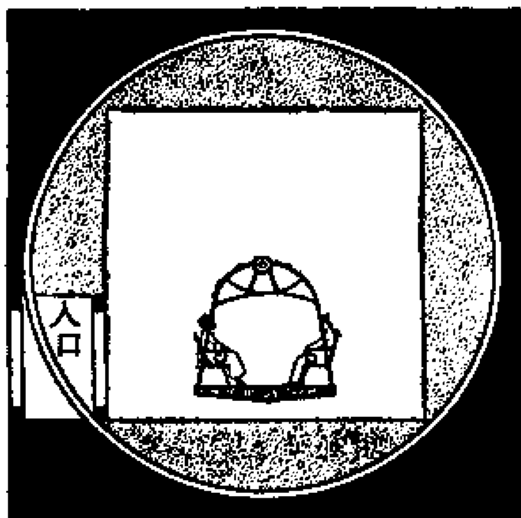


图 179 “魔术秋千”的构造简图

这时候，秋千摆动的幅度越来越大，看来就要荡得同横梁一样高了。秋千越荡越高，最后，它绕着横梁转了一周。运动越来越快了，这些荡秋千的人虽然大部分都已经知道这个游戏实际上是怎么一回事，也感觉到自己的确是在摆动，的确在做着迅速的运动。他们似乎觉得自己的头有时候是倒挂着，所以就本能

地抓着坐位的扶手，免得跌下来。

不久，秋千摆动的幅度开始减小了，已经不再同横梁一样高了。又过了几秒钟，它完全停了下来。

事实上，这秋千始终挂在那里，没有动过，而是这间屋子在一种非常简单的机件帮助下，绕着水平轴在游客周围转动着。屋子里的各种家具，都是固定在地板上或墙壁上的。那个罩着大灯罩的电灯看来好像很容易跌倒，其实也是焊在桌子上的。管理秋千的工作人员好像曾经轻轻地推动过秋千，使它荡起来，而实际上是屋子轻轻地摆动了一下，他只是做一个推的样子。所有一切都促成大家的错觉。

这个错觉的秘密，简直简单得可笑。然而在你现在懂得了这是怎么一回事以后，再去玩这个魔术秋千，你还是会受它欺骗的。错觉的力量竟有这样大!

普希金的一首关于“运动”的诗，你还记得吗?

“世界上没有运动。”一个满腮胡须的哲人[1]说。
另一个哲人[2]不开口，却在他面前来回地走。
他这个反驳真是再有力也没有。
人们都赞美这个奥妙的答复。
可是，先生们，这个有趣的事件，
使我想起了另外一个例子：
谁都看见太阳每天在我们头上走，
然而正确的却是固执的伽利略。

---

〔1〕指希腊哲学家芝诺(公元前5世纪)，他说，世界本是不动的，只因为我们有了错觉，所以好像任何物体都在运动。

〔2〕指第奥根尼。



在那些不懂秋千秘密的游客当中，你也可能做一个伽利略。你同伽利略有一点不同：伽利略曾经向大家证明太阳和星是不动的，我们自己才在旋转。而你却要向大家证明：我们是不动的，整个屋子在围着我们转。但你跟伽利略一样，所说的话都和常见的情况相反，所以你也很可能遇上伽利略的可悲的遭遇：被大家看作是一个睁眼说瞎话的人……

我们两人之间的争论

你要证明你的见解是正确的，也许不像你所想象的那样容易。设想你是在魔术秋千上，并且希望说服坐在你旁边的那些人，说他们是错了。譬如说同你争辩的就是我。我同你一起坐在秋千上。等到秋千摆动起来，看来正要开始绕着横梁翻斤斗的时候，我们就进行辩论：究竟是秋千还是整个屋子在转动。我们只是要记住，在争论的时候，我们不要离开秋千，并且事先带着一切要用的东西。

你：我们并没有动，而是屋子在转动，这一点还有什么可怀疑的呢！要知道我们的秋千如果真的是底朝上的话，那我和你决不会只是头朝下挂着，而是会从秋千上掉下去。但是你看，我们并没有掉下去。所以我说，转的不是秋千，而是屋子。

我：可是请你记住，水桶在转得很快的时候，虽然它的底朝天，里面的水也不会泼出来(图 178)。自行车在“魔环”里，虽然骑车的人(图 187)头朝着下面，也不会掉下来。

你：既然这样，让我们来算一下向心加速度，看它是不是能使我们不从秋千上掉下去。知道了我们与旋转轴的距离和每秒钟的转数，我们不难按照公式计算出来……

我：你不用算。建造“魔术秋千”的人知道我们会有争论



的，所以早就告诉过我，转数是完全足够使我们按照我的意思来说明这个现象的。所以计算并不能解决我们的争论。

你：可是我还没有失去说服你的信心。你看这玻璃杯里的水，并没有流在地板上……不过你已经用水桶旋转的试验驳倒我了。那么好吧，我手里还有一个铅锤，它始终朝着我的脚，也就是说，一直朝着下面，如果是我们在旋转，而屋子停着不动，这个铅锤就会始终向着地板，也就是说，有时候会朝着我们头的那一个方向，有时候会朝着旁边。

我：你错了，如果我们转得非常快，那么这个铅锤也总是顺着旋转半径从旋转轴往外抛出去；也就是说，它一定像我们看见的那样，始终朝着我们的脚的那一个方向。

争论结束了

现在让我告诉你们，怎样才能在这场争论里得到胜利。在你走上“魔术秋千”的时候，应当随身带一个弹簧秤，并且在秤盘里放上一块譬如说是 1 千克的砝码，然后看指针在哪里。它始终告诉我们这个砝码 1 千克重。这就是秋千不动的证据。

原来，如果我们带着弹簧秤绕着轴旋转，那么作用在砝码上的，除了重力以外，还有离心作用。这个离心作用在圆周路线的下半圈的各点上，会加大砝码的重力，而在上半圈的各点上，又会减小它的重力。这样，我们就能看到这个砝码有时候要变得重些，有时候却差不多一点重力都没有。既然没有看到这种情况，就可以确定是屋子在转，而不是我们在转。



在“魔”球里

有一个公园，为了供游人消遣，建造了一个极有趣而且有教育意义的转盘。那是一个旋转着的球形屋子。来到这里的人都会感到一种异常的感觉，这种感觉我想恐怕只有在梦里或者在神怪故事里才可能有。

先让我讲一下站在转得很快的圆形平台上的人的感觉。

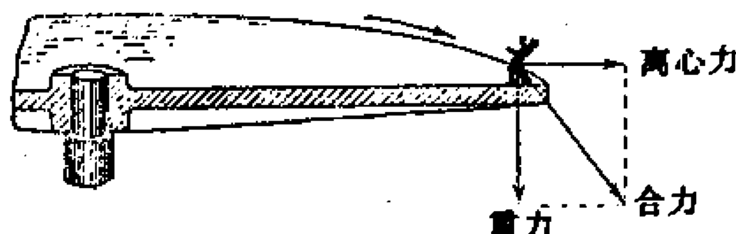


图 180　人在旋转着的平台上靠边的地方所得到的感觉

旋转运动要把人抛向外面去；你站的地方离中心越远，使你倾斜和把你向外拉的力量就越大。如果闭上眼睛，你就似乎觉得并不是站在水平的台面上，而是站在一个斜面上，并且很难使身体保持平衡。为什么会这样?看一下这时候有哪些力量作用在你身上(图 180)，就会明白。旋转运动把我们的身体向外拉，而重力把我们的身体向下拉。这两个力量按照平行四边形规则合在一起，使我们受到一个向下倾斜的合力。平台转得越快，这个合成运动也就越大，倾斜度也越大。

现在设想这个平台的边缘是向上弯的，并且你是站在这个倾斜的边缘上(图 181)。如果平台不动，你在这种地方就站不住脚，要溜滑或者甚至会跌倒。如果平台是在旋转的，那就是另外一回事了。这时候，在一定的速度下，这个倾斜面对你就会像是一个水平面，因为那两个作用在你身上的力的合力所指的方向也

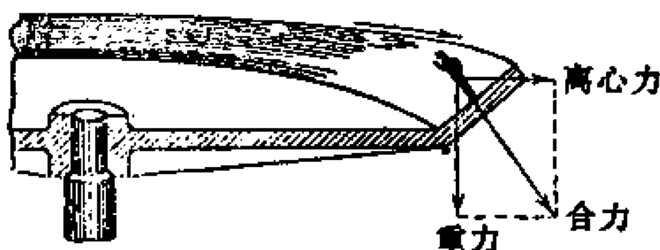


图 181　在旋转着的平台的倾斜边上，人能够站得很稳

是倾斜的，并且恰好同平台的倾斜的边缘成直角。[1]

如果旋转着的平台是这样的一个曲面，它的表面在一定的速度下处处都跟合力垂直，那么站在平台上所有这些点上的人，都会觉得自己是站在水平的平面上。用数学可以计算出，这样的曲面是一种特别的几何体——抛物体——的面。如果把一个装着半杯水的玻璃杯，绕着一个竖直轴很快地旋转，就可以得到这样的表面：这时候玻璃杯边上的水高了起来，中心的水低了下去，于是它的表面就成了抛物面。

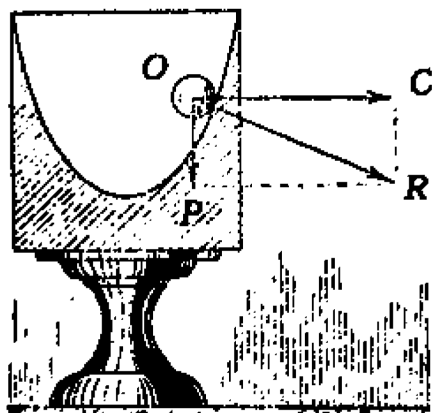


图 182　如果把这个杯子转得足够快，小球就不会滚到底里去

如果不用水，而是在玻璃杯里盛上一些熔化了的蜡，不断旋转杯子，直到杯里的蜡凝结成固体为止，那时候这个凝结成的表面就会是一个很精确的抛物面。这样的表面在一定的旋转速度里，对于重的物体就好像是一个水平面：放在它上面的任一点上的小球，都会留在那里，不会滚下来(图 182)。

现在就很容易理解“魔”球

〔1〕顺便说起，这也可以用来解释：为什么在铁路转弯的地方，外面的铁轨要比里面的垫得高一些；为什么给骑自行车的人和驾驶摩托车的人准备的车道，要朝里面倾斜一些；为什么专门长跑的人能够沿着倾斜得很厉害的环形跑道跑。



的构造了。

“魔”球的底(图 183)是一个很大的可以旋转的台，它的面正是一个抛物面。台的下面隐藏着机件，使它旋转得非常平稳。虽然这样，如果不使周围的物体跟着人一起移动，台上的人还是会觉得头晕的。为了使台上的人感觉不出自己是在运动，就得在这个旋转台的外面，罩一个用不透明的玻璃做的大球，并且让大球跟台转得一样快。

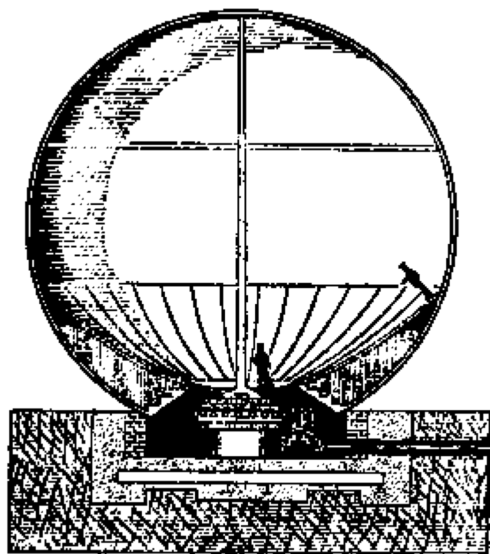


图 183　“魔”球(剖面图)

这个名字叫做“魔”球的转盘的构造就是这样。你要是站在这个“魔”球里面的台上，你会有怎样的感觉呢?它一旋转，在你脚下的地面就成了水平的。不管你是站在这个台的曲面上哪一点——台轴附近(在这里台面的确是水平的)也好，台的边缘(这里是 45°的斜坡)也好，你都会觉得它是水平的。在你的眼睛里，这个台很明显是个曲面，可是你肌肉却感到你是站在平坦的地方。

两种感觉彼此发生着非常显著的矛盾。如果你从台的这一边走向台的那一边，你就似乎觉得整个大球好像跟一个肥皂泡一样轻，跟着你身体的重力往那一边移它就往那一边侧：因为在所有的各点上，你都觉得自己是站在水平面上。而斜着站在台上的别人的位置，在你看来，就一定显得极不平常：你会觉得这人简直像苍蝇一样在墙上走(图 184)。

如果把水泼在这个球的地面上，水就会沿着球的曲面散开来，铺成薄薄的一层。在球里的人会觉得这里的水像是站在自己面前的一堵斜墙。

普通的重力规律在这个奇异的球里好像是失去效力了。而我

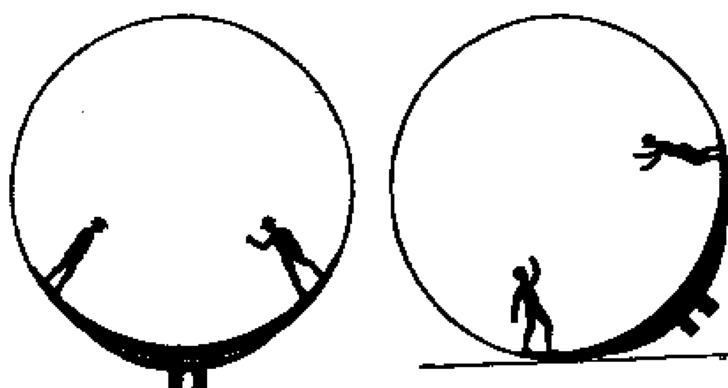


图 184 两个人在"魔"球里的实际位置
在旋转的时候每个人对别人的位置的感觉

们也好像是到了一个童话里的奇妙的世界……

在空中用极高速度盘旋的飞机里的飞行员也会有同样的感觉。举例来说，如果他用 200 公里每小时的速度沿着一个半径是 500 米的曲线飞行，那么，他一定似乎觉得地面是微微倾斜着，成了 16°的斜坡。

为了进行科学观察工作，曾经建造了一个和这相似的旋转实验室。这是一间圆柱形的屋子，直径是 3 米，旋转速度是 50 转每秒(图 185 和图 186)。因为实验室的地板是平的，所以在它旋转的时候，靠墙站着的观察的人似乎觉得屋子是向后斜着，因此他本人也不得不半倚在斜墙上(图 186)。

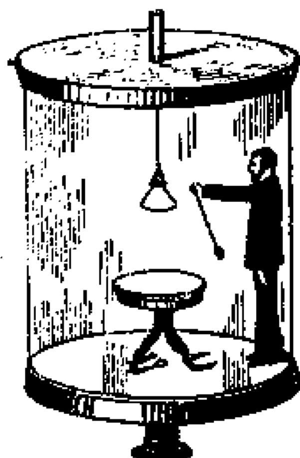


图 185 旋转实验室的实际位置



图 186 旋转实验室里的人所感觉到的位置

液体做的望远镜

反射望远镜上的反射镜，最好是抛物面的，也就是液体在旋转的容器里形成的那种表面的形状。制造望远镜的人要付出大量辛勤的劳动才能使反射镜有这样的表面。研磨望远镜用的反射镜的工作常常要延续好几年。美国的物理学家乌德为了解决这个困难，创造了液体镜面：他在一个大容器里旋转水银，得到一个理想的抛物面，由于水银能很好地反射光线，所以能起反射镜的作用。

这种液体做的望远镜的缺点是，稍一震动，液体镜面就会起皱纹，使像歪曲。而且水平的镜面只能观察到天空的天际。

“魔　　环”

你也许在杂技场里看到过一种使人头晕的自行车把戏：自行车手骑着车在一个圆环里从下而上绕一个整圈。他骑到这个环的上面一部分的时候，尽管头朝下，还是骑了过去。在杂技场里装着一条木头铺的路，中间有一个或几个环，像图 187 所画的那样。演员骑着车顺着环前面的一段倾斜部分冲下来，然后很快地顺着环连人带车一同向上冲去。他头朝下走完整个圆圈，安全地回到地面上。

这种稀奇的自行车把戏，在观众看来往往以为只是演员的技艺高超。观众有时候会莫名其妙地问自己：这个大胆的骑车的人头向下的时候，究竟是什么神秘力量支持他的呢？有些好疑

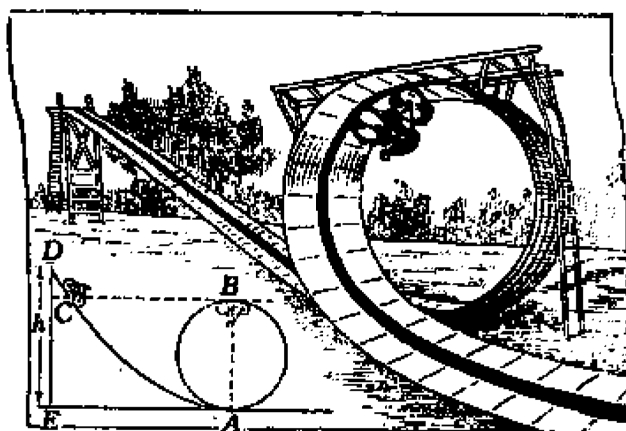


图 187　“魔环”。左下角是计算用的图

的人甚至会疑心这也许只是一种错觉，他们说在魔术里是没有什么超自然的作用的。其实这完全可以用力学的定律来解释。假使你让一个弹子沿着这条路滚去，它也会毫不逊色地表演出同样的把戏来。在学校的物理实验室里有一种小型的“魔环”，供你用小球来做这个实验。

为了试验“魔环”的坚固性，可以用一个很重的球从这条环形路上滚过去。球的重力应该同演员和自行车的总重力一样大。如果球能顺利地滚过去，那么演员也就可以骑着车驶过圆环去。

读者们当然想得出这种奇异现象的原因，同那个甩着转的水桶的现象一样(图 178)。可是这个把戏也并不是常常能够做得成功的，必须精确地计算出自行车手的出发地点的高度。不然的话，演出的时候会出乱子的。

杂技场里的数学

我知道枯燥无味的公式如果用多了，会吓倒有些物理学的爱好者。可是拒绝从数学方面去认识各种现象的人，一定不能预



见现象的过程和确定现象发生的条件。譬如说，在目前这一个例子里，只要两三个公式，就可以帮助我们精确地断定，在什么样的条件下才能成功地完成跑“魔环”那样的惊人把戏。

现在就让我们来计算一下吧。

我们用几个字母来代表要计算的一些数量：

h 代表自行车手出发地点的高度；

x 代表出发地点的那一段高度 h 里的高出“魔环”最高点的一部分高度；在图 187 里，这段距离是：$x=h-AB$；

r 代表环的半径；m 代表自行车手和自行车的总质量；重力可以用 mg 来表示，这里的 g 代表地球的重力加速度，它的数值，我们知道是 9.8 米/秒^2；v 代表自行车在到达环的最高点时候的速度。

所有这些数值，我们可以用两个方程式把它们联系起来。首先我们从力学里知道，自行车沿着斜坡往下滑，在滑到同 B 点一样高的 C 点(这个位置在图 187 的左下角图里标明着)的时候，它得到的速度等于自行车手把车骑到环的顶点 B 的时候所具有的速度。第一种速度可以用方程式[1] $v=\sqrt{2gx}$ 或 $v^2=2gx$ 来表示。因此自行车手到达 B 点时候的速度 v 也等于 $\sqrt{2gx}$，也就是 $v^2=2gx$。

其次，自行车手在到达圆环的最高点的时候，如果想不摔下去，他一定得在这里取得比重力加速度更大的向心加速度(见第 278 页)，也就是说，必须使

$$\frac{v^2}{r}>g \text{ 或 } v^2>gr$$

可是我们已经知道 $v^2=2gx$，所以

[1] 在这里，我们略去了旋转着的自行车轮圈的能量，这个因素对计算结果的影响很小。

$$2gx > gr，或 x > \frac{r}{2}$$

这样，我们知道，要顺利地做完这个稀奇的把戏，就必须这样建造这个“魔环”，使这条路的倾斜部分的最高点比环的最高点高出环的半径的1/2以上，或者高出环的直径的1/4以上。你看，路的坡度在这里并没有关系——需要的只是自行车手的出发点要比环的顶点高出环的直径的1/4以上。不过，自行车的摩擦力的影响在这里没有提到：我们把车在C点和B点的速度看做是一样的。因此，决不能把路做得太长，把斜坡做得太平。在斜坡太平的情况下，由于摩擦的结果，自行车到达B点时候的速度就会比它在C点的时候小。举例来说，如果环的直径是16米，那么演员出发点的高度就应该不小于20米。如果不具备这个条件，演员的技术无论多么高明，也不能骑过“魔环”：到不了环的顶点，他必然会摔下来。

应该指出，玩这个把戏的时候，车上不必装链条，自行车手只是在重力的作用下使车前进。这时候，他不能、其实也不必要加快或减缓自己的动作。他的全部技术只是把自行车保持在路的中心线上。如果自行车稍有倾斜，他就有从路上滑下被抛向地面的危险。车在圆环里前进的速度是非常大的：在直径是16米的环里绕一圈只要3秒钟。这已经是60公里每小时的速度了！用这种速度骑自行车，当然是不很容易的。可是也没有太大的困难，只要勇敢地信赖力学定律也就可以了。我们可以从表演这种技艺的人写的小册子里，读到这样几句话：“只要计算得正确和设备够坚固，自行车把戏本身是不危险的。这个把戏会不会发生危险，完全看演员自己。如果演员的手发抖，如果他很激动，失去了自制力，如果他出乎意料地表演得不好，那就难免会发生事故。”

根据这同一条定律的，还有大家知道的飞机翻跟斗和别种特



技飞行。在翻跟斗的时候，最重要的是要驾驶员能够沿着曲线作正确的快飞，并且能够熟练地操纵飞机。

重力的短少

一个爱打小算盘的人有一天告诉大家说，他能够不用欺诈的方法就少给买主分量。这秘密就是到赤道附近地方去进货，而到两极附近去销售。大家早就知道，物体在赤道附近比在两极附近轻一些，1 千克的货物从赤道运到两极，大约会增加 5 克。然而在买卖的时候，不能够使用普通的秤，而必须使用弹簧秤，并且这个弹簧秤要在赤道上制造(刻度数)。不然的话，就得不到什么好处，因为货物变重了，砝码也同样变重了。

这种投机取巧的思想当然要不得，但是这种说法倒是有科学根据的：离赤道越远，重力的确会越大。它的原因是，在地球转的时候，在赤道上的物体所绕的圆周最大，同时也由于在赤道附近地球是凸出的。

重力的短少主要是由于地球的自转，它使在赤道附近的物体的重力比同一物体在两极的时候轻 1/290。

把很轻的物体从一个纬度搬到另一个纬度，重力差别是很小的。可是对于庞大的物体，这个差别可以达到很大的数字。你也许想不到，譬如一艘轮船在莫斯科重 60 吨，到了阿尔汉格尔斯克会增加 60 千克，而到敖德萨会减轻 60 千克。从斯匹次卑尔根群岛每年要向南方各港埠运出煤 300 000 吨。假如这些数量的煤运到赤道上的某一个港埠，那么我们用从斯匹次卑尔根带来的弹簧秤来称它的时候，就会发现它已经减少了 1 200 吨。一艘在阿尔汉格尔斯克重 20 000 吨的战舰，到了赤道附近的水面上，大约会减轻 80 吨。但是这并没有人能够觉察出来，因为一切别的

物体也相应地减轻了，海里的水当然也不例外。[1]

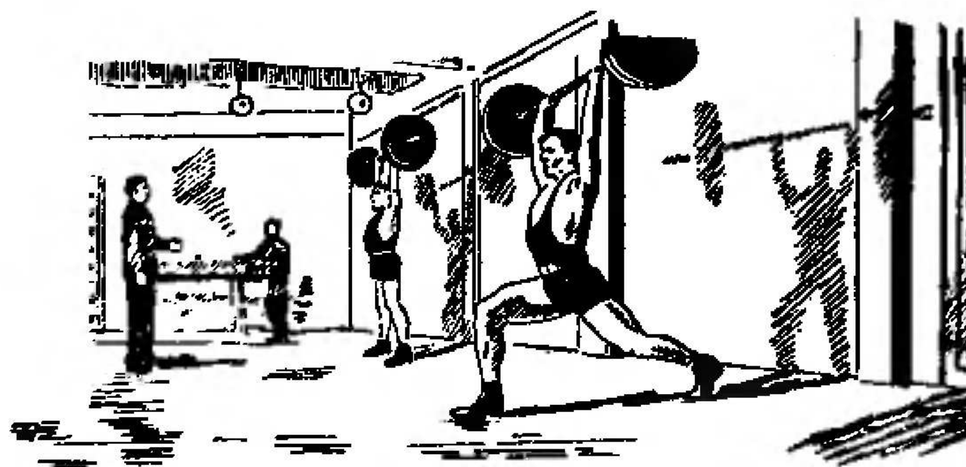
假如地球自转的速度比现在快，譬如说，一昼夜的长短不是24小时，而是4小时，那么，在赤道上和在两极上，物体重力的差别就会更显著。在一昼夜只有4小时的情况下，在两极重1千克的砝码，拿到赤道上会变得只有875克重。这正和土星上重力的情况大致相同：在这个行星的两极附近，一切物体都比它们在赤道上的时候重1/6。

我们知道，向心加速度跟速度的平方成正比，因此就不难算出，地球要转得多快，赤道上的向心加速度才会增加到原来的290倍，也就是说，增加到和地球的重力加速度相等[2]。在自转速度等于现在的17倍的时候，就会出现($17\times17\approx290$)。在这种情况下，物体就不会对支持它的东西加上压力。换句话说，假如地球自转的速度等于现在的17倍，那么赤道上的物体就会完全没有重力。在土星上，自转的速度只要大到目前的2.5倍，也可以出现这样的情况。

---

〔1〕因此，顺便说说，船只在赤道附近的水面上的吃水深度，仍旧同在两极水面上一样，虽然船只变轻了，可是被船只排开的水也同样变少了。

〔2〕前面说过，物体在赤道的重力要比在两极的重力少1/290，而这主要是由于地球的自转，这就是说，物体在赤道上所受的向心加速度，相当于重力加速度的1/290。那么，若把赤道的向心加速度加大到290倍，当然就等于重力加速度。



14 万有引力



引力大不大

“如果我们不是时时刻刻都看见物体在坠落，那它对我们说来就会是一种非常奇怪的现象了。”有名的法国天文学家阿拉哥这样说。习惯使我们对地球吸引着地面上一切物体的现象，看成是非常自然而且极普通的现象。可是当有人对我们说，物体彼此间也是互相吸引着的，那我们就会不十分相信了。因为在日常生活里我们没有见过类似的事情。

那么，为什么万有引力定律不在我们周围环境里经常表现出来呢？为什么我们看不到桌子、西瓜、人体互相吸引着呢？这里的原因就是，对小物体来说，引力太小了。让我们举一个明显的例子。有两个人相隔 2 米站着。这时候他们是互相吸引着的，可是这中间的引力小极了：对中等体重的人说来，这个力量还不到 1/100 毫克。这就是说，两个人彼此吸引的力量，等于一个十万分之一克的砝码压在天平盘上的力。这样小的重力，只有科学实验室里的最灵敏的天平才能察觉出！这样小的力当然不能使我们移动——我们的脚与地板之间的摩擦力阻止着我们移动。为了使我们譬如说在木制的地板上移动(脚跟木制地板之间的摩擦力等于体重的 30%)，至少得用 20 千克的力。跟这个力相比较，1/100 毫克的引力简直小得可笑。因为 1 毫克是 1 克的 1/1000，1 克又是 1 千克的 1/1000，所以 1/100 毫克只等于那个能够使我们移动的力的五亿分之一！这样说来，在平常的条件下，我们一点也察觉不出地面上各种物体之间有相互吸引的作用，就没有什么奇怪了。

假使没有了摩擦，事情就不同了。这时候甚至连最弱的引力也会使物体相互接近。不过在 1/100 毫克的引力下，两个人

接近的速度应该是非常小的。可以算出，在没有摩擦的情况下，相隔2米站着的两个人，在第一小时会彼此相向移动3厘米；在第二小时，他们会再接近9厘米，第三小时再接近15厘米。他们的运动越来越快，但是要这两个人紧紧地靠拢，至少要经过5小时。

地面上各种物体之间的引力，在摩擦力并不造成阻碍作用的情况下，也就是说在物体平衡的情况下，是可以发觉出来的。挂在线上的重物，是处在地球引力的作用下的，所以那条线会指向下面。但是在这个重物的附近，如果有个很大的物体在把重物吸向自己方面，那么，这条线就会略微偏离竖直的方向，而指向地球引力和另外那个物体的很小的引力所合成的合力的方向。在大山附近，铅锤会偏离竖直线，这种现象是在1775年第一次观测到的：那时候在同一座大山的两侧，测定铅锤的方向与指向星空的极的方向之间的夹角，发现两侧的角度不一样。后来，又用了有特殊装置的天平对地面上各种物体之间的引力做了更加完善的实验，才精确地测定了万有引力。

在质量不大的物体之间，引力是非常小的。质量加大的时候，引力是跟质量的乘积成正比的。不过有许多人常常夸大这个力。有一位科学家，固然他不是物理学家而是动物学家，曾经想说服我，说那常常在海船之间看见的相互引力，也是万有引力的结果！不难算出，万有引力在这里是一点关系也没有的：两只各重25 000吨的大轮船，在相距100米的时候，相互吸引的力不过400克。不用说，这样小的力是不能使这两只轮船在水里作哪怕是很小的一些位置移动的。轮船之间的这种谜一般的引力的真正原因，我们在以后讲流体特性那一章里再讲。

对质量不大的物体说来是非常小的引力，在庞大的天体之间却变得很大了。因此甚至是那离开我们极远的行星——海王星，它几乎是在太阳系的边上慢慢地绕转着的，也能使我们地球受到1 800万吨的引力！虽然太阳离我们远得不可思议，可是也只是由

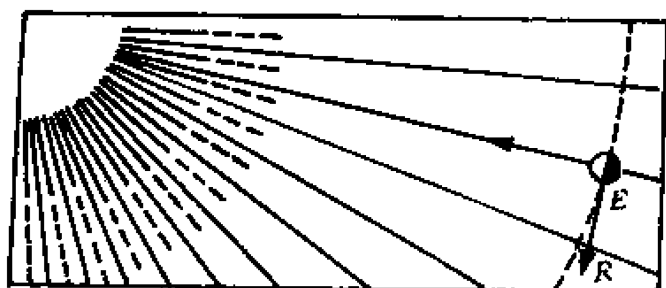


图 188　太阳的引力使地球 *E* 的路线变成曲线。由于惯性作用，地球想沿着切线 *ER* 飞出去

于太阳的引力，才使地球能够维持在自己的轨道上(图 188)。假如太阳的引力由于某种原因消失了，那我们的地球就要沿着轨道的一条切线飞入无边无际的宇宙空间去，永远不再回头了。

从地球到太阳的一条钢绳

让我们想象，太阳的强大引力由于某种原因真的消失了，那地球就要面临一个悲惨的命运，永远向那寒冷而且幽暗的宇宙深处飞去。你可以想象一下——这里需要幻想——假定工程师们决定要用实在的链条来代替那看不见的引力的链条，或者说，他们干脆想用结实的钢绳把地球跟太阳连起来，使地球留在圆形的轨道上绕着太阳转。真的，有什么东西比每平方毫米能经受住 100 千克拉力的钢更坚固的呢?那就让我们想象一条直径是 5 公里的大钢柱吧。它的切面，用整数来说，是 2 000 万平方米，所以只有用 20 000 亿吨的重物才能把这根柱子拉断。我们再想象用这样的钢柱从地球上伸到太阳里，使两个天体连在一起。你知道得用多少根这样的大柱子，才能把地球维系在自己的轨道上?得用 200 万根!为了使你更清楚地想象这一个分布在大陆和海洋上的钢柱的森林有多么密，让我再补充一句：假定所有钢柱都均匀地

分布在面向太阳的那半个地球的表面上，那相邻的各根钢柱之间的空隙，只比钢柱本身略微宽一些。这样大的一座钢柱的森林，你想象一下得用多大的力才能把它拉断。从这里你就可以想象得出，太阳和地球之间的看不见的相互引力有多强。

可是这样大的力用来使地球的路线发生弯曲，也只是迫使地球每秒钟离开切线 3 毫米。由于这个缘故，地球所走的路线成了一个封闭的椭圆形。3 毫米只有书上一个铅字那么高。强迫地球每秒钟移动这些路，就需要这么大的力，这不是怪事吗！然而这却可以说明地球的质量有多么大，即使用这样大的力也只能使它移动这样小的一点距离。

能不能躲开万有引力

现在让我们幻想：假如太阳和地球之间的相互引力消失了，那会发生些什么情况呢？地球摆脱了那看不见的引力的链条以后，就会飞向无边无际的宇宙深处。现在让我们来幻想另一个题目：如果重力没有了，地面上的一切物体会变成怎样一种情况呢？那时候，什么东西也不能停留在地球上，只要轻轻一推，它们就会向星际空间飞去。然而也不必等到推动，地球的自转就会把一切跟地球表面没有牢固地连结在一起的东西抛到空中去。

英国作家威尔斯就曾经用这一类的想法写了一本月球旅行的幻想小说。在《月球上的第一批人》这篇作品里，这位聪明的小说家提出了一种在行星之间旅行的非常奇怪的方法。原来这篇小说的主角是一位科学家，他发明了一种有奇异性能——能够阻止万有引力通过——的物质。如果在任何物体下面涂上一层这样的物质，那它就能摆脱地球的引力，而只受到别的物体的引力的作用。这种幻想的物质，威尔斯给它取名叫“凯伏利特”，是用那

个假想的发明人凯伏尔的名字来命名的。

这篇小说的作者写道：

> 我们知道，万有引力或重力是能够透过一切物体的。你可以设下障壁去截断光线，使它射不到物体上面；你可以利用金属片来保护物体，使无线电波达不到它。可是你一定找不到一种障碍物可以用来保护物体，使它不受太阳的引力或地球的重力的作用。在自然界里为什么找不到那种能截断引力的障碍物，那很难说。可是凯伏尔不相信这种透不过引力的物质一定不能存在。他认为自己一定能够用人工方法创造出这样一种能够截断引力的物质。
>
> 每一个只要有一些幻想能力的人，就很容易想象出：有了这种物质，我们就能得到一种很不平凡的能力。举例来说，如果要举起一个重物，那就不必管这个重物有多重，只要在它下面铺一张用这种物质制的薄片，就能把它像稻草一样地举起来。

有了这种奇妙的物质以后，小说里的主角就要制造一个飞行器，准备大胆地坐在里面飞到月球上去。这个飞行器的构造不很复杂，里面什么发动机件也没有，因为它是利用天体的引力来移动的。

下面是关于这个幻想的飞行器的描写。

> 设想有一个球形的飞行器，里面相当宽大，容纳得下两个人和他们的行李。飞行器有里外两层壳，里面一层用厚玻璃做，外面一层用钢做。飞行器里可以放压缩空气、浓缩食品、做蒸馏水用的仪器。整个钢球外面要涂上一层“凯伏利特”。里面的玻璃壳除了舱门以外，



都密实无缝。外面的钢壳却是一块块拼起来的，每一块都能够像窗帘一样卷起来。这是很容易用特制的弹簧来制造的。窗帘可以在玻璃壳里通过白金导线用电流来卷起和放下。可是这些都已经是技术上的细节。主要的是飞行器的外壳好像都是用窗子和“凯伏利特”的窗帘组成的。在全部窗帘都放下来遮得极严密的时候，不论是光线，不论是哪一种辐射能或是万有引力都透不进球里来。可是你想象：有一个窗帘卷起来了。这时候，远处任何一个恰好正对这个窗口的大物体，都会把我们吸引过去。这样，我们实际上就可以在宇宙空间随意旅行；一会儿让这个天体来吸引我们，一会儿让另一个天体来吸引我们，结果，我们要上哪儿，就可以上哪儿。

威尔斯小说里的主角是怎样飞上月球的

威尔斯把这个星际旅行的交通工具从地面出发的情形描写得非常有趣。涂在飞行器外面的那一薄层“凯伏利特”，使它变得好像完全没有重力了。要知道，没有重力的物体是不能平静地停在大气海洋的底层的；像湖底的软木塞会很快浮上水面一样，这个没有重力的飞行器也会很快被地球自转的惯性抛到大气海洋的上层去。它浮出了大气的边界以后，就要自由地继续在宇宙空间旅行。小说里的主角们正是这样飞走的。到了宇宙空间以后，他们一会儿开这些窗，一会儿开那些窗，使飞行器的内部一会儿受到太阳的引力，一会儿受到地球或月球的引力，结果他们就到达了月球的表面。后来，这些旅行家当中有一个人，又坐了这个飞行器回到了地球上。

在这里我不打算分析威尔斯的见解实质上什么样，我准备在另一本书里谈到它，并且说明它为什么是毫无根据的。现在姑且让我们相信这位聪明的小说作者，并且跟着他笔下的英雄们到月球上去。

月球上的半小时

现在让我们看威尔斯这篇小说里的主人公，来到一个重力比地球上要小得多的世界以后，曾经有过什么样的感觉。

请你读一下《月球上的第一批人》这本小说里的最有趣的几段话[1]，这是一个刚到过月球的地球上居民的代表说的。

> 我于是旋开了飞行器的舱门，跪着把上身伸到舱外去：在下面离我的头1米远的地方，有一片从来没有人践踏过的月亮上的雪。
>
> 凯伏尔用被褥裹着身体，坐在舱边上，开始小心地把两只脚放下去。在把脚放到离地面0.15米高的时候，他迟疑了一会儿，最后还是溜到了这个月球世界的地面上。
>
> 我隔着圆球的玻璃外壳望着他。只见他走了几步，站了一会儿，四面望了望，然后决定向前跳。
>
> 玻璃歪曲了他的动作，但我觉得他实际上是跳得太快了些。凯伏尔一下子就出现在离我6～10米远的地方。他站在一块岩石上向我做手势。可能他还在高声叫我呢——我却听不到声音……可是，他为什么要跳

[1] 这里所引的段落里，已经把不大重要的地方删去了。



着走呢?

因为莫名其妙，我也就爬出舱口，跳了下去。我觉得我似乎是落在雪洼的边缘上。走了几步以后，我也开始跳了。

我觉得我似乎在飞，很快就到了凯伏尔站着等我的那块岩石附近。抓住了岩石以后，我感到非常恐慌。

凯伏尔弯着腰，用尖锐的声音向我大叫，要我小心些。

我本来已经忘记了月球的引力只有地球上的1/6。现在实际的情况提醒了我。

我抑制着自己的动作，小心地爬到了岩石的顶上。我好像患了风湿病那样，慢慢地走去，走到阳光下面，同凯伏尔站在一起。我们的飞行器正躺在那正在融化的雪堆上，离我们大约有10米。

“你看。”我转过身来对凯伏尔说。

可是凯伏尔忽然不见了。

我呆立了一会，对这件意外的事情觉得非常诧异。后来我想看看岩石外边的情形，就急忙向前走去，却忘了自己是在月球上。我那时候所用的力，如果还是在地球上，只能使我移动1米。但是在月球上却使我移动了6米。我发现自己已经一步跨到了岩石外边5米的地方了。

我感到了一种应当在梦里才能有的飞翔在空中的感觉；在落下来的时候，我感到自己好像是落到了深渊里一样。人在地球上往下落的时候，第一秒钟大约落下5米，可是在月球里，第一秒钟只能往下落80厘米。这就是为什么我能够很平稳地向下飞9米的缘故。我似乎觉得这次降落的时间很长，大约延续了3秒钟。我在空中飘着，像羽毛一样平稳地往下落，落到了那岩石嶙峋

的山谷底，齐滕盖没在雪堆里。

“凯伏尔！”我环视了四周，大声叫着。但是连凯伏尔的脚印都没有发现。

“凯伏尔！”我更高声地叫着。

突然，我看到了他：他站在离我大约20米的一个光秃秃的峭壁上，笑着向我做手势。我听不清楚他的话，可是懂得他手势的意义：他叫我向他那里跳去。

我有些犹豫不决：我似乎觉得距离太远了一些。可是我立刻想到，凯伏尔能够跳到这么远的地方，我大概也能跳到那里。

我就后退一步，用足气力向前跳。我像箭一样飞入了空中，似乎再也落不下来。这是一次神秘的飞行，奇怪得好像在做梦一样，可是同时也使我感到非常愉快。

我跳的时候似乎用力太大了：一下子就飞越过了凯伏尔的头顶。

在月球上打靶

原苏联科学家齐奥尔科夫斯基写过一篇中篇小说，叫做《在月球上》。从这篇小说里摘下一些段落来，可以帮助我们理解在重力作用下运动的条件。在地面上，大气妨碍着物体在它里面运动，因此本来很简单的物体坠落的定律，因为有了许多附加条件而变得复杂起来。在月球上是基本没有空气的。因此，如果我们真的能够到月球上去进行科学研究，那它一定会是一个最好的研究物体坠落的实验室。

在摘录小说里的故事以前，让我先介绍两个在故事里交谈着



的人：他们都在月球上，正在研究枪里放出的子弹在月球上是怎样运动的。

“可是，火药在这里能不能起作用呢？”

“爆炸物在真空里甚至比在空气里威力更大，因为空气只会阻碍火药爆炸开来；至于氧气，那它是不必要的，因为火药本身所含的氧已经足够了。”

“我们把枪口朝上放，以便子弹射出去以后可以在附近找到……”

一道火光，微弱的声音，[1]地面微微有些震动。

“枪塞到哪里去了？它应当就在这附近。”

“枪塞是跟子弹一起飞出去的，它大概不会落在子弹的后面。因为在地球上有大气阻碍它跟着子弹一起飞走；而在这里，就是羽毛落下和飞向空中的速度，也和石头一样。你拿一片从枕头里掏出来的羽毛，我拿一个小铁球。你能够像我用小铁球一样方便，用手里的羽毛击中一个靶子，甚至是离得很远的靶子。在这种重力很小的情况下，我能够把小球掷到400米远，你也能够把羽毛掷过同样的距离；固然你掷的东西是不会打坏任何东西的，甚至在掷的时候，你也感觉不到你是在掷什么东西。我们两个人力气差得不多，让我们用全力把手里的东西掷向同一个目标：就掷向那块红色花岗石吧……”

结果羽毛好像被强烈的旋风刮着一样，略微赶在铁球的前面。

“可是这是怎么一回事呢？从开枪到现在已经有3分钟了，子弹却还没有下来！”

---

〔1〕这里的声音不是经过空气而是经过土地和人体传来的。

“大概再等两分钟，它一定会回来的。”

果然，两分钟以后，我们觉得地面微微有些震动，同时在不远的地方，看到那个正在跳着的枪塞。

“这颗子弹飞出去的时间真长啊！它能升得多高呢？”

“70 公里。因为这里的重力小，并且没有空气阻力，所以子弹能够飞得这么高。”

现在让我们来验算一下。如果子弹离枪口时候的速度是 500 米每秒(这相当于新式枪的 2/3)，那么，在地球上没有空气的情况下，这颗子弹的上升高度是：

$$h = \frac{v^2}{2g} = \frac{500^2}{2 \times 10} = 12500 \text{ 米}$$

也就是 12.5 公里。而在月球上，重力只有地球上的 1/6，这里的 g 也只有 1/6，因此，子弹在月球上能够飞到的高度是：

$$12.5 \text{ 公里} \times 6 = 75 \text{ 公里}$$

无 底 洞

地球的核心部分是由什么东西组成的，现在还知道得很少。有些人认为在几百公里厚的坚硬的地壳下面，就是炽热的液体。有些人认为整个地球一直到中心都是凝固的。要解答这个问题比较困难，因为现在最深的矿井也只有 7.5 公里深(人迹能到的最深的矿井更浅，只有 3.3 公里)，[1] 而地球的半径却是 6 400 公

[1] 波克斯堡(在南非洲的德兰士瓦)的一个金矿，矿井口高出海平面 1 600 米，这就是说，从海平面算起的矿井深是 1 700 米。



里。如果能够沿着地球的直径钻一个洞一直穿过它，那不用说这种问题就可以解决了。可是现在的技术还远不能实现这样的计划——虽然现在在地壳上所凿的井的总长度已经超过了地球的直径。关于穿过地球钻凿地道的事，18世纪的数学家莫泊丢和哲学家伏尔泰曾经想过。已故的法国天文学家佛兰马理翁曾经把这个计划重新提了出来(当然是另一个计划，规模也比较小)。在那篇专讲这个题目的文章的前面，有一幅图画，现在让我们把它复制在这里(图189)。

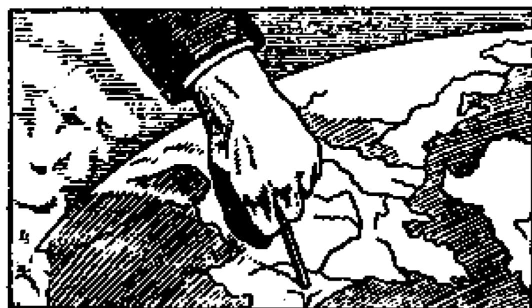


图189　如果沿着地球的直径钻个洞

当然，像这一类的事情，直到现在还没有人做过；不过我们可以想象有这么一个无底洞，用来研究一个有趣的问题。如果你落进了这样一个无底洞，你会怎么样呢(暂时让我们忘记空气的阻力)?和洞底相撞是不会的，因为这里没有底。那么，你会停留在哪里呢?

停留在地球的中心吗?不会的。

当你落到地球中心的时候，你的身体下落的速度会有这样大(大约8公里每秒)，使你根本没法停留在这一点上。你会继续不断向前飞去，运动速度逐渐变慢，一直飞到洞的另一端的边缘。到了这里，你就应当牢牢地抓住洞边，不然你又要落进洞里，再来一次穿洞旅行，在洞的另一端出现。如果在那里你还是抓不住任何东西，那你又会重新落进洞里，就这样来回摆动，没完没了。力学告诉我们，在这种条件下(让我再说一次，如果不计算洞里空气的阻力)，物体应当不停地来回摆动。[1]

这样穿洞一次，需要多少时间呢?整个路程来回一次需要

[1] 在有空气阻力存在的情况下，来回摆动会逐渐变弱，最后人会停留在地球的中心。

84分24秒，用整数来说，大约是一小时半。

佛兰马理翁接下去说：

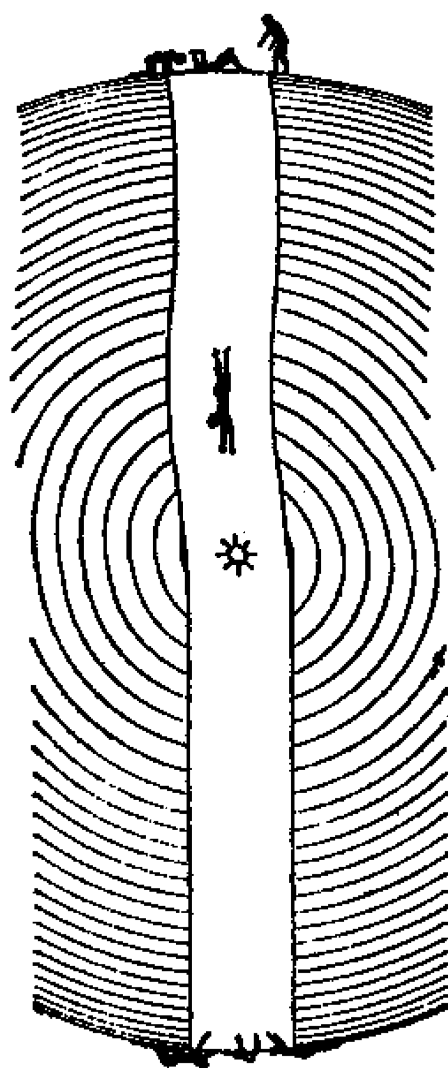


图190　物体落进穿过地心的洞以后，就会不停地从洞的一端到另一端来回摆动。每来回一次的时间是1小时24分

> 如果这个洞是顺着从一个极到另一个极的地轴掘的，情况就会像上面说的那样。可是，如果我们把出发点移到别的纬度上，移到欧洲、亚洲或非洲大陆上，那么就得把地球自转的影响也计算进去。大家知道，地球表面上的每一个点都在奔跑。赤道上的各点每秒钟跑465米，而在巴黎的纬度上，每秒钟跑300米。由于离地球的自转轴越远，圆周的速度越大，所以扔进洞里的小铅球不会笔直地落进去，而要略微偏向东面。因此如果在赤道上挖掘无底洞，就应该把它掘得极宽，或者掘得十分倾斜，因为从地面落下的物体所走的路，会远远离开地心而偏向东面。
>
> 假使洞的入口是在南美洲的一个高原上，这个高原的高度假定是两公里，而洞的对面那一端是在海面上，那么，因为不小心而落进美洲那一端洞口的人，在到达



对面洞口时候的速度，一定可以使他在出洞口以后再向上飞两公里。如果洞的两端都在海面上，那么那个穿洞的人在洞口出现的时候，飞行速度已经等于零，我们就可以伸出手去接住他。而在前一种情况下，我们应当小心地闪在旁边，免得和那位飞得极快的旅行家相撞。

童话里的道路

从前，列宁格勒出现过一本书名很奇怪的小册子，叫做《彼得堡和莫斯科之间的自动地下铁道。一本还只写成三章、未完待续的幻想小说》。这本小册子的作者提出了一个聪明的计划，当时凡是爱好物理学上的奇异现象的人，都对这个计划感到兴趣。



图 191　如果在列宁格勒和莫斯科之间挖掘一条隧道，那么火车就能不用火车头，靠本身的重力在里面往返行驶

他的计划，"不多不少，只是挖掘一条 600 公里长的隧道，把俄国新旧两个首都用一条笔直的地下线路连接起来。这样，人类就第一次有可能在笔直的道路上行走，而不必像过去那样走弯曲的道路了"（作者的意思是，我们所有的道路都是沿着弯曲的地面筑成的，所以都是呈弧形的，而他所设计的隧道却是笔直的，是沿着一条弦行进的）。

这样的隧道，如果真的能掘成，一定会有一种世界上任何道

路所没有的奇异的性能。这种性能就是：任何车辆在这样的隧道里都能自己行动。

让我们回想一下刚才讲过的贯通地球的无底洞吧。从列宁格勒到莫斯科的隧道也是这样的一个无底洞，只是它不是沿着地球的直径，而是沿着地球的一条弦挖掘的。的确，在你看图 191 的时候，你会觉得这个隧道是水平的，火车一定不能利用重力在里面行驶。可是这只是你的错觉：你可以想象朝着隧道的两端画的两条地球的半径(半径的方向就是竖直线的方向)，这时候你就会看出隧道并不和竖直线的方向成直角，也就是说不是水平的，而是倾斜的。

在这样的倾斜隧道里，所有物体都会在重力的作用下来回移动，并且总是紧贴着隧道的底部。如果在隧道里建筑铁道，那么火车就会在里面滑着行驶：车身的重力代替了火车头的牵引力。一开始，火车走得很慢；以后自动火车的速度就越来越高；不久速度就达到了难以想象的大小，终于使隧道里的空气会显著地妨碍着火车的运动。现在让我们暂时忘掉这种空气障碍物——正是它使我们的许多吸引人的计划无法实现——而继续研究火车的行驶。火车在接近隧道中点的时候，就达到了极大的速度——比炮弹还要快几倍！这样的速度几乎可以使火车一直开到隧道的另一端。假如没有摩擦力，那就连“几乎”这两个字也用不着了：火车不用火车头，会自己从列宁格勒一直开到莫斯科。

火车这样走一趟所需要的时间，同物体穿过沿着地球直径挖掘的无底洞所需要的时间一样：42 分 12 秒。非常奇怪，时间的长短竟跟隧道的长短没有关系；从莫斯科到列宁格勒，从莫斯科到海参崴，或者从莫斯科到墨尔本，都需要同样的时间。[1]

任何别的车辆——摇车、马车、汽车等——所需要的时间也

---

〔1〕还有一件有关无底洞的奇异的情况，就是物体在无底洞里往返所需要的时间，跟行星的大小无关，只跟它的密度有关。



都是一样。这种童话式的道路并不像童话里说的那样它本身会移动，可是所有的车辆却可以在它上面自动地疾驰，用难以想象的速度从一端驶向另一端!

怎样挖掘隧道

请看图 192，上面画的是修筑隧道的三种方法。你说哪一条是水平地掘过去的?

不是上面一条，也不是下面一条，而是沿着弧线挖掘的中间那一条。在这条弧线上的所有各点都跟竖直线(或地球的半径)成直角。只有它才是水平的隧道——因为它的曲度完全跟地面的曲度相符合。

通常大隧道都是照图 192 的上面那个图的样子建造的：它是沿着跟隧道两端的地面相切的那两条直线走的。这样的隧道，开始微微向上升起，后来又微微向下斜。它的好处是里面不会积水，水会自己流出洞口来。

假如隧道是严格地按照水平的方向建造的，那么长隧道就成了弧形。里面的水也就不会向外流，因为隧道里每一点的水都是在平衡的状态中。这样的隧道长度超过 15 公里的时候(例如瑞士新普伦隧道就长达 20 公里)，你就不能站在隧道的一头看到它的另一头：你的视线被隧道的顶遮断了，因为这样的隧道的中点要比它的两端高出 4 米以上。

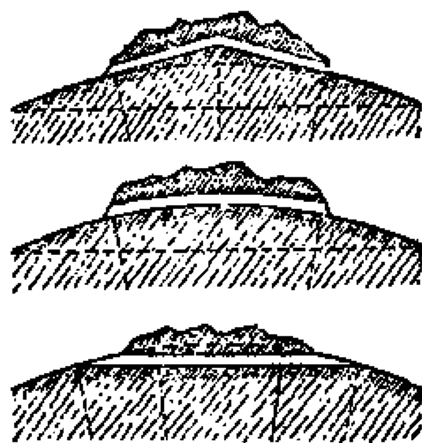


图 192　穿过高山修筑隧道的三种方法

最后，如果沿着一条连接隧道



两端的直线来建造隧道，那就会从两端微微地向中点倾斜。这时候水不但不能向外流，并且相反地会积在中间它的最低的部分。可是如果你站在这种隧道的一端，却可以望见它的另一端。从附图里就可以看出这一点。[1]

〔1〕从以上所说的看来，一切水平线都是弯曲的，直的水平线是不可能有的。反过来，竖直线却一定是直的。



15 乘着炮弹旅行

在结束关于运动和引力定律的讲话以前，让我们来研究一下在月球上的幻想旅行，这在儒勒·凡尔纳所写的两部小说《炮弹奔月记》和《月球旅行记》里有非常有趣的描写。读过他的小说的人一定记得，随着北美战争结束，巴尔的摩大炮俱乐部里几个会员闲着没事干，决定铸造一门巨炮，使炮里可以装进一颗极大的、里面坐得下旅客的空心炮弹，用大炮把这个炮弹车厢射到月球去。

这个想法是不是荒诞无稽的呢？首先，能不能给物体这样一种速度，使它离开地球表面不再回来呢？

牛 顿 山

现在先引用发现万有引力定律的牛顿的几句话。他在自己所著的《自然哲学的数学原理》里说道(为了容易懂，这里只意译了他的原文)：

> *掷出去的石块在重力作用下，会离开直线方向而走一条曲线落到地上。石块掷出去的速度大一些，它就飞得远一些；因此它也可能依一条长到10公里、100公里、1 000公里的弧线，甚至会飞出地球界限而不再回来。设AFB(图193)是地球的表面，C是地球的中心，UD、UE、UF、UG表示从很高的山顶上向水平方向掷出的物体在速度一次比一次大的情况下所走的几条曲线。我们在这里不考虑大气的阻力，也就是假定大气是完全不存在的。在初速不大的情况下，物体走的是曲线UD；速度大一些，就走UE；更大一些，就走UF、UG。在速度达到某种程度的时候，物*



体就要环绕整个地球转一周，又回到投掷它的地方。因为在物体回到出发点的时候速度并不比当初掷出它的时候小，所以这物体又会沿着这条相同的曲线继续向前运动。

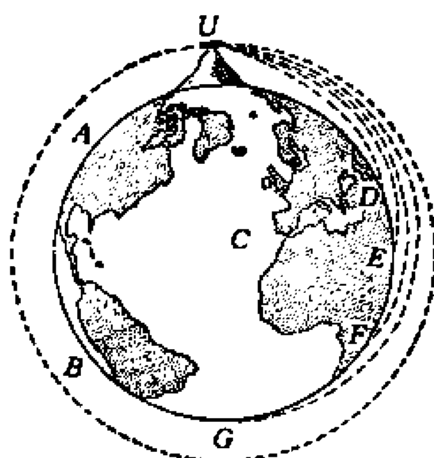


图 193　在高山顶上用极大的速度向水平方向投掷的石头，应当怎样下落

假如在这座想象的高山顶上一门炮，那么从炮里射出的炮，只要速度高到一定的程度，就会不再回到地球上来，而要不地绕着地球转。利用十分简单的算法不难算出，在炮弹的速度到大约 8 公里每秒的时候，就会出现这种情形。换句话说，从里射出的炮弹，如果速度高到 8 公里每秒，它就会永远离开地，成了地球的一颗卫星。这颗卫星运动的速度是赤道上任何一的速度的 17 倍，在 1 小时 24 分里环绕地球一周。假如使这颗弹有更大的速度，那它绕着地球转的路线就不再是一个圆，而一个多少拉长了的椭圆，椭圆的一端可以离开地球很远。炮弹初速度如果比这还大，那它就要永远离开地球而飞向宇宙空间。这只要使炮弹的初速度达到大约 11 公里每秒就可以了(所有些讨论都是假定炮弹是在真空里，而不是在空气里运动的)。

现在让我们看看，用儒勒·凡尔纳所建议的方法，能不能实这种想法。现代的大炮不能使炮弹在第一秒钟的速度超过 2 公每秒。这只等于飞上月球所需要的速度的 1/5。但是小说里的些主人公却认为如果他们能够造成一门极大的炮，再装上大量火药，就可以得到很高的速度，把炮弹射到月球去。

幻想的大炮

于是那些大炮俱乐部的会员铸了一门巨炮，它长250米，竖直地埋在地下。又造成了大小相当的炮弹，在它里面有客舱。炮弹重8吨。炮里装有火药——火棉——160吨。火药爆发以后，如果我们相信小说家的话，炮弹得到了16公里每秒的速度，但是由于空气的摩擦，这个速度减小到11公里每秒。这样，儒勒·凡尔纳的炮弹飞出了大气界外的速度，还足够使它飞到月球上去。

小说里就是这样说的。这在物理学上应该怎样说呢?

儒勒·凡尔纳的设计站不住脚的地方，完全不在通常会使读者发生怀疑的那一点上。第一，可以证明用火药的大炮永远不能使炮弹得到3公里每秒以上的速度(这一点在我的《行星际的旅行》那本书里有证明)。

此外，儒勒·凡尔纳没有估计到空气的阻力，而这在炮弹的速度达到这样高的情况下，可能会大大地甚至完全改变炮弹飞行的路线的。即使连这些也撇开不谈，这个乘炮弹飞向月球的设计，还是有严重的破绽。

这个设计对旅客说来危险性极大。你别以为危险要在从地球飞到月球的那一段时间里发生。假如旅客们能够活着离开炮口，那么在以后的旅程当中实在是一点危险也不会有的。旅客乘着炮弹在宇宙空间里奔驰，速度虽然很大，但这对他们却没有害处，就像地球绕着太阳转的速度比这还大，却对地球上的居民一点没有害处一样。



沉重的帽子

对我们旅客说来，最危险的时候是炮弹在炮膛里运动的那百分之几秒钟里。因为在这样短促的时间间隔里，旅客在大炮里运动的速度要从零增加到16公里每秒。难怪小说里的旅客们在等待开炮的时候是这样地发着抖。巴尔比根肯定说，在炮弹射出的时候，坐在炮弹里面的旅客所遇到的危险，并不比立在炮弹前面的人小，这是完全正确的。的确，在发射炮弹的时候，在客舱底部从下面来的打击旅客的力，跟在炮弹行进路线上的任何被击中的物体所受到的力一样大。小说里的主人公把危险看得太小了，他们认为，在最坏的情况下，只不过是头上出些血……

实际上情况是很严重的。炮弹在炮膛里是加速运动着的：火药爆发时所形成的气体的压力会使炮弹的速度加大。在1秒钟的极小一段时间里，它的速度要从零增大到16公里每秒。为了简单起见，让我们假定这里的速度是均匀地增加着的。这样，为了要在这么短的时间里使炮弹的速度增加到16公里每秒，你就得用一种加速度，它的数值，用整数来说，达到640公里每二次方秒(算法见第317页)。

你知道地球表面上的重力加速度只有10米每二次方秒[1]，那就可以完全懂得这个数字的严重性了。由此可见，炮弹里的每一个物体在发炮的时候加在舱底上的压力，会是这个物体的重力的60 000倍。换句话说，旅客们会感觉到他们好像比平时重了几万倍!在这样巨大的重力作用下，他们立刻会被压死。巴尔比根

〔1〕让我补充一句，一辆竞赛用的汽车，在它开始迅速运动的时候，加速度是不会超过2～3米每二次方秒的；一列平稳地开出车站的火车，它的加速度不超过1米每二次方秒。

先生的一顶大礼帽在发炮的那一瞬间会重到 15 吨(一辆满载货物的火车厢的重力)。这样的礼帽一定会把它的主人压成肉饼。

的确，小说里也曾经提到过一些减轻撞击的方法：在炮弹里装上有弹簧的缓冲装置和在两个底之间的空间装上满盛着水的夹底。这样，撞击的时间就略微延长了一些，因而速度的增加也缓慢一些。可是在这样大的力的作用下，这些装置的效用实在太小了。把旅客压向地板的力也许会减小一些，可是一顶重 15 吨或 14 吨的礼帽不是同样会把人压死的吗?!

怎样减轻震动

力学告诉了我们怎样来缓和速度的急剧增加。

如果把炮筒加长许多倍，就可以做到这一点。

不过如果我们想在放炮的时候，使炮弹里面的“人造”重力和地球上的普通重力相等，那就得把炮身造得非常长。一个大致的计算表明，为了做到这一点，必须把炮身不多不少恰恰加长到 6 000 公里。换句话说，儒勒·凡尔纳的“哥伦比亚”号大炮应当向地球内部伸去，一直伸到它的正中心……这时候，炮弹里的旅客才能够摆脱所有不舒服的感觉：加在他们身上的除普通重力以外，只有由于速度慢慢增加而产生的极微的重力；他们受到的全部重力只比以前增加一倍。

不过，人体在极短的时间里，是受得住比平时大几倍的重力而不受损害的。当我们坐着雪橇从冰雪的山上滑下来在途中很快地改变自己运动方向的时候，我们的重力在这一瞬间会显著地增加，也就是说，我们的身体会比平时更有力地压在雪橇上。重力增加到 3 倍是不会感到很不舒服的。如果我们假定人在很短的时间里能够承受住甚至是 10 倍的重力，那么，铸造一门长 600 公



里的炮，也就够了。不过这也没有什么可以高兴的，因为就是这样的炮，在技术上也是不可能制造的。

你看，只有在什么样的条件下，儒勒·凡尔纳的引人入胜的设计——乘坐炮弹飞向月球——才有在想象中实现的可能。[1]

你想自己来算一算吗

在这本书的读者当中，一定可以找到一些人，想自己验算一下上面所提到的那些数字。这里我就把这些算法介绍一下。当然，所得出的数值只是近似的，因为这里所根据的是：假定炮弹在炮膛里是按照均匀的加速度运动的(实际上速度的增加不是始终相等的)。

要做这种计算，必须用下面两个有关匀加速运动的公式：

在 t 秒钟末，速度 v 等于 at，这里的 a 代表加速度，

$$v = at$$

在 t 秒钟里所经过的距离 s，可以用下面的公式求得：

$$s = \frac{1}{2}at^2$$

让我们先用这两个公式来求得炮弹在“哥伦比亚”号大炮的炮膛里向前滑进的加速度。

小说告诉我们，那门大炮没有装火药的炮膛部分是210米，这也就是炮弹要走的路 s。

我们也知道，最后的速度 $v = 16000$ 米/秒。有了 s 和 v 的

---

〔1〕儒勒·凡尔纳在小说里描写飞行炮弹的内部条件的时候，曾经有过一种重要的疏忽，这位小说家没有考虑到，炮弹射出以后，炮弹里的一切东西在整个飞行期间完全失掉了重力，因为引力使炮弹和炮弹里的一切东西得到了相同的加速度(再参看后文“儒勒·凡尔纳小说里漏写的一段”那一节)。

数值，我们就可以求得 t——炮弹在炮膛里运动的时间了(把这运动看作是一种匀加速运动)。既然

$$v = at = 16000$$

那么，
$$210 = s = \frac{at \cdot t}{2} = \frac{16000t}{2} = 8000t$$

因此，
$$t = \frac{210}{8000} \approx \frac{1}{40}\text{秒}$$

炮弹在炮膛里显然只走了 $\frac{1}{40}$ 秒！把 $t = \frac{1}{40}$ 代到公式 $v = at$ 里，可以得出

$$16000 = \frac{1}{40}a$$

因此
$$a = 640000\ \text{米/秒}^2$$

可知炮弹在炮膛里运动时候的加速度是 640 000 米/秒^2，也就是说，比重力加速度大 64 000 倍。

应当用多少长的炮膛才能使炮弹的加速度只是重力加速度的 10 倍，也就是 100 米/秒^2 呢?

这是一个把我们刚才的算法倒过来算的问题。已知：$a = 100$ 米/秒^2，$v = 11000$ 米/秒(在没有大气阻力的情况下，这样的速度是足够的)。

从公式 $v = at$，我们得出 $11000 = 100 \cdot t$，由此可以算出 $t = 110$ 秒。

从公式 $s = \frac{1}{2}at^2 = \frac{1}{2}at \cdot t$，我们得到炮膛的长度应当是 $\frac{11\ 000 \times 110}{2} = 605000$ 米，用整数来说，就是 600 公里。

这样算出来的一些数字，就可以驳倒儒勒·凡尔纳小说里的引人入胜的计划。



16 液体和气体的性质

不会淹死人的海

人们从古代起，就已经知道世界上有不会淹死人的海。这就是有名的死海。死海里的水非常咸，任何生物都不能在里面生存。炎热而又不下雨的巴勒斯坦的气候，使海面的水发生剧烈的蒸发作用。可是蒸发掉的只是些纯水，至于溶解在里面的盐却还是留在海里，因此，盐的浓度越来越大了。这就是为什么死海里的水的含盐量不跟大多数海和洋一样只有 2% ~ 3%，而是有 27% 以上，并且还随着水的深度而加大。这样，死海里所含的物质当中，就有 1/4 是溶解的盐。这里的盐的总含量，据估计大约有 4 000 万吨。

由于这样高的含盐量，死海就有了一种有趣的特征：这里的水比普通的海水重得多。在这样重的液体里，人不会沉下去：人体比它还要轻。

我们身体的重力比相同体积的浓盐水要轻得多，所以按照浮体的规律，人不可能在死海里下沉；人会浮在水面上，像鸡蛋会浮在盐水上一样(鸡蛋在淡水里会下沉)。



图 194　仰卧在死海水面上的人(根据照片画的)

幽默作家马克·吐温游历了死海以后，曾经用有趣的笔调描写了他和他的同伴们在死海的很重的水里洗澡的时候所得到的异常的感觉：

> 这是一次有趣的沐浴！我们竟不会沉下去。在这里，我们可以把身体完全伸直，并且把两手放在胸部，仰卧在水面上，而大部分身体却仍旧在水面上。这时候我们还可以把头完全抬起来……你能够很舒服地仰卧着，把两个膝盖抬到下颚下面用双手抱住它们——不过这样会使你很快就翻一个斤斗，因为头部太重了。你可以头顶着海水竖起来，使自己从胸膛中部到脚尖这一段身体露在水面上，不过你不能长久地保持这种姿势。你不能仰游得很快，因为你的脚完全露在水面上，只好用脚跟推水。如果你俯着身体游泳，那你就不能前进，反而要后退。马在死海里既不能游泳，也不能直立，因为它的身体太不稳定了——它一到水里，只能侧着身体躺在水面上。

在图 194 中，你可以看到一个人很舒服地躺在死海的水面上。水的比较大的密度能使他用这种姿势看书，并且拿着伞遮住炙热的阳光。

卡拉博加兹湖湾(里海的一个海湾)里的水[1]和含盐量达到27%的埃尔唐湖里的水，都有这种特别的性质。

进行盐水浴的病人，也常常有这一类的经验。如果水的含盐量太大——譬如像斯达罗露斯克矿水那样，病人就必须使用很大的力气，才能使自己的身体贴在浴盆底上。我曾经听到过一位在斯达罗露斯克疗养的妇人生气地埋怨说，水老是把她从浴盆里往外推。显然，她认为这是疗养院管理人员的过失……

---

〔1〕卡拉博加兹湖湾里的水的密度是 1.18×10^3 千克/米^3。

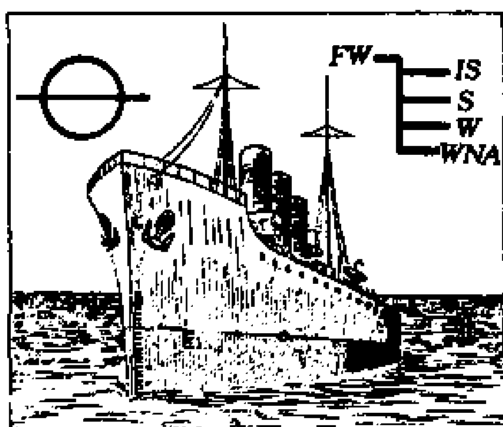


图 195　船侧的满载记号。记号标明在吃水线上。为了清楚起见，我们把它放大了。字母的意义见正文

在不同的海里，水的含盐量也是各不相同的。由于这个缘故，船身的吃水深度也不一样。读者当中也许有人曾经在船的侧面吃水线附近看到过一种"鲁意记号"。这种记号就是用来标明船在各种密度的水里的最高吃水线的。例如图 195 画的满载记号，就是船只满载时在各种海水里的最高吃水线：

在淡水里（*Fresh Water*）…………………………… *FW*
在印度洋，夏季（*India Summer*）…………………… *IS*
在咸水里，夏季（*Summer*）………………………… *S*
在咸水里，冬季（*Winter*）………………………… *W*
在北大西洋，冬季（*Winter North Atlantic*）……… *WNA*

最后还应该指出，在不久以前又发现了另外一种水，这种水的不含杂质的纯态比普通水要重：它的密度是 1.1×10^3 千克/米^3，也就是说比普通水重 10%。因此，在这种水的池里，甚至连不会游泳的人也不会沉下去。新发现的这种水叫做"重水"，它的化学式是 D_2O(在它的组成里的氢原子，比普通氢原子重一倍，它的符号是字母 D)，普通水里含有很少量的重水：10 升饮水里大约含有重水 2 克。

我们现在已经能够得到几乎是纯净的重水 D_2O 了。在这种纯净的重水里，只含普通水 0.05%。[1]

〔1〕重水在原子技术里，尤其在原子反应堆里，用途很大。可以用工业方法从普通水里得到它。



破冰船是怎样工作的

在洗澡的时候，请你利用机会做下面的试验。在跳出浴盆以前，先打开它的放水孔，继续让自己的身体躺在盆底上。这时你的身体露出水面的部分在逐渐加多，同时你也觉得你的身体在逐渐变重。在这种情况下，你可以极清楚地看出，只要你的身体一露出水面，它在水里失去的重力(你可以回想一下你在水里的时候曾经觉得自己是多么轻啊!)就立刻恢复。

鲸鱼不由自主地在做着同样的试验——在退潮的时候，如果搁在浅水滩上，也会有同样的感觉的。但是这对它会引起致命的后果：它会被自己的惊人的重力压死。难怪本来是哺乳动物的鲸鱼，却要住在水里：水的浮力能够救它，使它免得因重力的作用被压死。

以上所讲的跟本文的标题有很密切的关系。破冰船的工作是用相同的物理现象做基础的：露在水面上的那一部分船身，因为它的重力没有水的浮力作用把它抵消掉，所以仍旧有它原来的“陆上”重力。你不要以为破冰船在行驶的时候是用自己的船首部分的压力不断地切开冰的。破冰船不是这样工作的，这样工作的是切冰船，例如像在30年代著名的“里特克”号。这种工作方法只能用来对付比较薄的冰。

真正的海洋破冰船是用另外一种方法工作的。破冰船上的强大的机器在开动的时候，能把自己的船首移到冰面上去。它的船首的水下部分就是因为这个缘故造得非常斜。船首出现在水面上的时候，就恢复了自己的全部重力，而这个极大的重力就能把冰压碎。为了加强作用力，有时候在船首的贮水舱里，还要盛满水——“液体压舱物”。

在冰块的厚度不超过半米的时候，破冰船就是这样工作的。遇到更厚的冰块，就要用船的撞击作用来制服它。这时候破冰船就向后退，然后用自己的全部质量向冰块猛撞上去。这时候起作用的已经不是重力，而是运动着的轮船的动能；船好像变成了一个速度不大但是质量极大的炮弹，变成了一个撞锤。

几米高的冰山，破冰船就得用它坚固的船首猛烈撞击几次，才能把它们撞碎。

参加过 1932 年有名的“西伯利亚人”号通过极地的航行的水手马尔科夫曾经这样描写过这只破冰船的工作：

> 在几百座冰山中间，在密实地覆盖着冰的地方，“西伯利亚人”号开始了战斗。连续 52 小时，信号机上的指针老是在从“全速度后退”跳到“全速度前进”。在 13 班每班 4 小时的海上工作里，“西伯利亚人”号疾驰着向冰块冲去，用船首撞它们，爬到冰上把它们压碎，然后又退了回来。厚达 3/4 米的冰块慢慢地让出了一条路。每撞一次，船身就可以向前推进 1/3。

船沉下去沉到哪儿

有一种流行的说法，甚至在海员当中也这样流传着，说是沉没在海洋里的船不会沉到海底，而是不动地悬浮在深海的某些地方，在那里，海水“已经因为上面各层水的压力的关系而变得密度相当大了”。

这种说法，看来连《海底两万里》的著者儒勒·凡尔纳也表示同意。在这本小说的一章里，他描写了一只沉没了的船不动地

悬浮在水里；在另一章里，他又提到一些“破船悬浮在水里”。

这一类见解是不是正确呢?

这类见解似乎有些根据，因为水的压力在深海里的确可以达到极大的程度。沉在 10 米深处的物体，每平方厘米所受到的水的压力只有 10 牛顿。而在 20 米深处，这个压力已经是 20 牛顿，在 100 米深处是 100 牛顿，在 1 000 米深处是 1 000 牛顿。海洋里有许多地方，深度有达到好几公里的；大洋的最深部分(太平洋中马里亚纳群岛附近的深海)，有达到 11 公里以上的。很容易计算出，在这些极深的海洋里，水和沉在水里的物体所受到的压力有多大。

如果把一个紧塞着瓶塞的空瓶投在相当深的水里，然后再把它拿上来，你就会发现瓶塞已经被水压进了瓶子，而瓶子也完全装满了水。海洋学家约翰·牟莱在所著的《海洋》那本书里说他做过这样的一个试验：拿三根不同粗细的玻璃管，管的两头都是烧熔封闭的，把它们卷在帆布里，然后放在一个上面有孔可以让水自由进出的铜制的圆筒里。把圆筒沉在 5 公里的深处。等到把它拿上来的时候，帆布里已经满是雪一样的东西：那是碎玻璃。如果把一块木头沉在同样深处，拿上来以后，它就会像砖头一样沉到水桶底——水已经把它们压紧到这样的地步。

看来，我们自然会这样想，这样大的压力一定会把深海里的水压得非常密实，使重的物体到了那里也不能再往下沉，像铁秤锤在水银里不能下沉一样。

可是这一类见解其实是一点根据都没有的。实验告诉我们，水同一切普通液体一样，也是不容易压缩的。每一平方厘米的水受到 10 牛顿压力的时候，它的体积只能缩小二万二千分之一，以后每增加 10 牛顿的压力，大致也只能再缩小这么些。假如我们想把水压得这样密实，使铁到了里面也不会沉下去，那就得把水的密度增大到原来的 8 倍。可是，要把水的密度增大一倍，也就是说把水的体积缩小一半，就得对每一平方厘米的水加

上 110 000 牛顿的压力(假定水在这样大的压力下压缩率也是这么大的话)。这样的压力只有在海面下 110 公里的地方才有!

从这里可以明白，要说深海里的水会显著地变得密实，那是完全不可能的。在海洋的最深处,水的密度也只是增大了 11/220,也就是说,比正常的水的密度约大 5%。[1] 这对各种物体在那里的浮沉条件，几乎没有什么影响，何况浸在这里的固态物体也要受到这种压力，因而也会变得密实些。

所以沉没的船只会一直沉到海底，是一点疑问也没有的。约翰·牟莱说:“凡是在一杯水里能够沉的一切东西，到了最深的海洋里，也应当能一直沉到底。”

我曾经听到过有人对这一点提出的反对意见。如果你小心地把玻璃杯底朝天浸在水里，它就能悬浮在水里，因为它所排开的那一部分体积的水的重力，正同玻璃杯的重力相等。如果所用的是比较重的金属杯子，那它也会悬浮在水里，不过位置稍低一些，但不会沉到底下去。当巡洋舰或别种船只倾覆了往下沉的时候，大概也同样会停留在半路上。如果船上某些地方关住了空气而泄不出来，那末船也会沉到一定深度以后，停留在那里。

要知道有不少船是在底朝天的状态下沉到海里去的，所以里面一定有一些船没有沉到海底，而只是浮悬在幽暗的深海里。固然这种船的平衡状态只要轻轻一推动就会失去，失去平衡以后，它就会翻过身来装满水，一直沉到水底下去。可是我们知道，海洋的深处永远是十分平静的，连暴风雨的回声都浸透不进去，那末又往哪里去找这种推动力呢?

所有这些论证，在物理学上的根据都是错误的。底朝天的玻璃杯并不能自己沉到水里去。它同木块或塞紧了瓶塞的空瓶一

---

〔1〕有人计算过，如果地球的引力突然消失，水变得没有了重力，那末海洋的水平面就会平均上升 35 米(因为被压缩的水恢复了正常的体积)。这时候 500 万平方公里的陆地就会被海洋里的水淹没。原来这些陆地就只是因为周围海里的水被压缩了，才出现在水面上的。



样，必须在外力的作用下才能沉到水里去。同样，倾覆的船也不会往下沉，而要留在水面上。要叫它停留在从海面到海底的半路上，那无论如何是不可能的。

怎样实现儒勒·凡尔纳和威尔斯的幻想

现在，所有的真正的潜水艇在许多方面不但赶上了儒勒·凡尔纳所幻想的“鹦鹉贝”号，并且还胜过了它。不错，现在潜水艇的航行速度还只有“鹦鹉贝”号的一半：现在的潜水艇每小时航行 43.2 公里(24 海里)，而儒勒·凡尔纳所想象的是每小时航行 90 公里(50 海里)。现代的潜水艇最长的航程是环行地球一周，而船长尼摩却完成了加倍的航程。但是在另一方面，“鹦鹉贝”号的排水量只有 1 500 吨，船上的水手只有二三十人，同时又不能连续在水底停留 48 小时。而在 1929 年造的属于法国舰队的“休尔库夫”号潜水艇却有 3 200 吨以上的排水量，管理它的水手多到 150 人，在水下潜伏不动的时间可以长到 120 小时[1]。

这艘潜水艇在完成从法国港口到马达加斯加岛的航行的时候，中途并没有在任何港口停靠过。“休尔库夫”上的人在居住方面，同“鹦鹉贝”上的人一样舒适。同尼摩船长的潜水艇比较，它还有一种显著的优点，就是在它的上层甲板上建筑有不透水的飞机库，用来停留侦察用的水上飞机。

另外还应当指出一点，儒勒·凡尔纳没有替它的“鹦鹉贝”号装置潜望镜，所以他的潜水艇不能从水里观察水面上的情况。

只在一个方面，真正的潜水艇要长久地落在这位法国小说家

[1] 现代装备了原子发动机的潜水艇，能够在不大了解的深海和深洋里自由选择航程。这种潜水艇航程非常远，不用在半路上浮出水面来加油。

的幻想后面：它人水不能那样深。

可是必须指出，在这一点上，儒勒·凡尔纳的幻想又超越了实际可行的范围。小说里的某一处说，“船长尼摩到达了海面下3 000、4 000、5 000、7 000、9 000和10 000米的深处。”而有一次“鹦鹉贝”号还下沉到一个空前的深处——沉到16公里深。小说的主人公说，“我觉得潜水艇铁壳上的拉条好像在发抖，它的支柱好像弯曲了，窗子好像在水的压力下在向里凹。如果我们的船不是像一个浇铸成的整体那样坚固，它立刻就会被压成饼了。”

小说里的主人公这样提心吊胆是完全有理由的，因为在水下16公里的深处(假如海洋里有这样深的地方的话)水的压强可以达到

$$16\ 000 \div 10 = 1600\ \text{千克力/平方厘米}$$
$$\approx 156\ 800\ \text{千帕}$$

这样的压力是不能压碎铁的，可是毫无疑义会压坏船的结构。不过这样深的地方在现在的海洋地图上是找不到的。在儒勒·凡尔纳时代(小说是在1869年写成的)一般人都认为海洋有这么深，这完全是由于当时的测深工具有缺点。那时候，用来作测锤线的不是铁丝而是麻绳。麻绳做的测锤线人水越深，就越会被水的摩擦力截留住。到了十分深的地方，摩擦力就会大到即使我们尽量放松测锤线，它也不能再往下沉：只能使麻绳纠缠在一起。而这却造成一种不正确的印象，以为水非常深。

现代的潜水艇至多能经受住25个大气压[1]，这就决定它们最多只能下沉到250米的深处。要下沉到更深的地方就得使用特别的装置，叫做潜水球(图196)。这种装置是专门用来研究深海里的动物群的。它的形状并不像儒勒·凡尔纳的“鹦鹉贝”，而像另一位小说家威尔斯在故事《在海洋深处》里所幻想的深水

[1] 1标准大气压=101325帕。全书同。



球。这个故事的主人公坐在厚壁的钢球里，沉到了9公里深的海底。这个钢球在潜水的时候并不带绳索，而是带着可以拆卸掉的重物。在海底里，只要把潜水球所带的重物拆卸掉，它就变得轻了，很快就飞升到水面上。

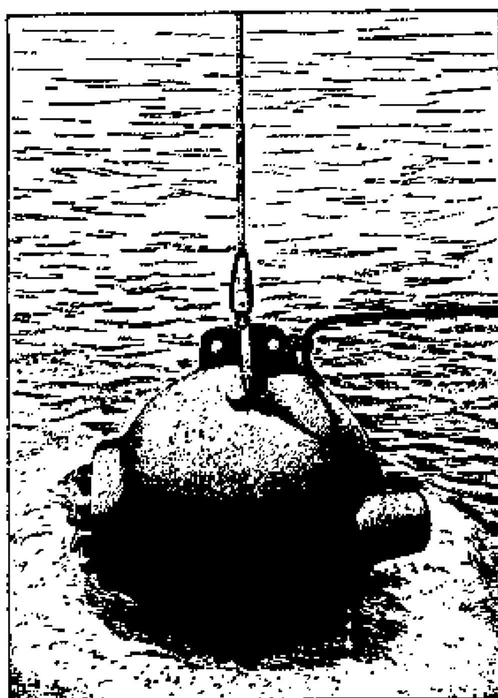


图196　用来沉到海洋深处去的钢质潜水球。球壁厚约4厘米，直径是1.5米，重力达24 500牛顿

在潜水球里，科学家已经到达了900米以下的深处。潜水球用钢索从船上放入深海，球中人可以跟船上人用电话保持联系。

不久以前，有的国家建造了几艘研究深水情况的特殊装置——不动式潜水球。它跟潜水球有一点最不相同：潜水球能在深海里运动、前进，而不动式潜水球只能悬在钢索下面。开始的时候，这种不动式潜水球先是下沉到海面下3公里多的地方，后来到达过4 050米的深处。1959年11月，这种装置又下沉到5 670米，但这还不是它的极限。1960年1月9日，到达了7 300米，1月23日，又在马里亚纳深海里还沉到了11 500米的深处。

“萨特阔”号是怎样打捞起来的

在广阔的海洋里，每年总要沉没大大小小船只几千艘，特别是在战争的年代里。有一些很有价值而又容易打捞的沉船，已经

被打捞起来。在这些打捞起来的船里面，有一艘很大的帝俄时代的破冰船“萨特阔”号，它是在1916年由于船长的疏忽而沉没在白海里的。在海底躺了17年以后，这艘极好的破冰船才捞了起来修理好。

捞船的技术完全是用阿基米德原理作根据的。在沉没的船体下面的海底上，潜水手掘了12条沟道，在每条沟道里穿过一条结实的钢带。带的两头固定在特地沉在破冰船两旁的浮筒上。全部工作都是在海面下25米的深处完成的。

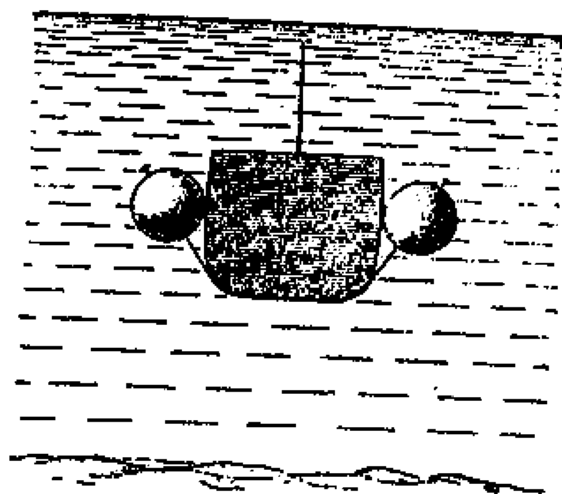


图197 打捞“萨特阔”号破冰船示意图。图上画的是破冰船、浮筒和钢带的剖面

浮筒(图197)就是一种不会漏气的空铁筒，长11米，直径5.5米。铁筒重达50吨。按照几何定理，很容易求出它的体积大约是250三次方米。非常明显，这样的空筒一定会浮在水面上：它本身重50吨，而它所排开的水却有250吨，就是说，它的载重力等于250吨减去50吨，即200吨。为了让浮筒沉到海底去，先得往里面装满水。

把12条钢带都固定在沉在海底的浮筒上以后，就开始用软管往浮筒里压入压缩空气。在25米的深处水的压强是$\frac{25}{10}+1$，也就是3.5大气压。现在却用约4个大气压的空气往筒里压，所以能把筒里的水排出来。空筒变轻以后，四周的水就用很大的力把它们推向海面。它们在水里浮升上来，就像气球在空中浮升一样。当把所有浮筒里的水全部排出以后，它们总的浮力是200×24=4800吨，这已经超过了沉没了的“萨特阔”号的重力。所



以为了更平稳地使船浮起来，空筒里的水只能排出一部分。

虽然是这样，“萨特阔”号还是经过几次失败以后才浮出海面的。“水下特殊工作队”的主任、船舶工程师波布利茨基在叙述他的领导工作的时候说道：“打捞队在获得成功以前，曾经出了几次事故。有三次，在紧张地等着的时候，我们看到浮上来的并不是船，而是混在波涛和泡沫之间自己冲上水面来的一些浮筒和破碎的软管。有两次，它已经被捞上来了，没有等我们把它系住，又重新沉了下去。”

水力“永动机”

在许多“永动机”的设计当中，有不少是根据物体在水里能浮起的原理设计的。让我们从这一类的发明里选一种来谈一谈。这是一个高20米、里面装满水的高塔。在塔的上下两头各装一个滑轮，滑轮上绕一条坚固的绳索，就像一条循环带。在绳上装上14只空的方箱，方箱的每边长1米。方箱是用铁皮制成的，水不能够透进去。图198和图199画的就是这种塔的外形和它的纵剖面。

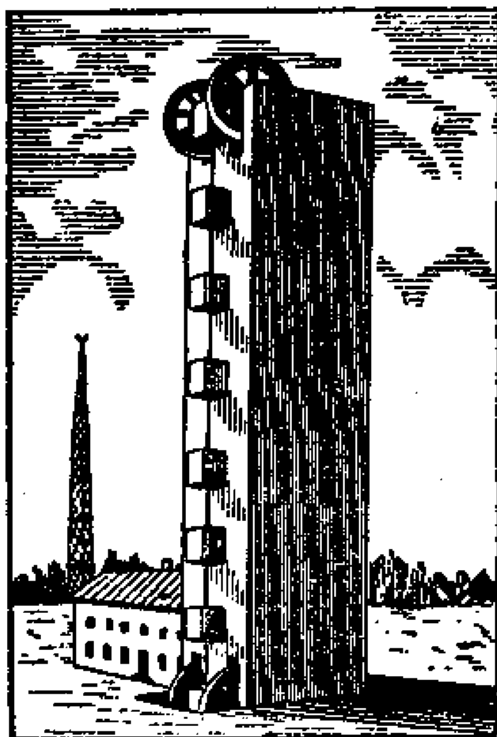


图198　水力“永动机”的想象设计图

这种装置是怎样工作的呢？每一个懂得阿基米德原理的人都能理解，水里的铁箱一定要往上面浮。推它们上升的力就是它们所排开的水的重

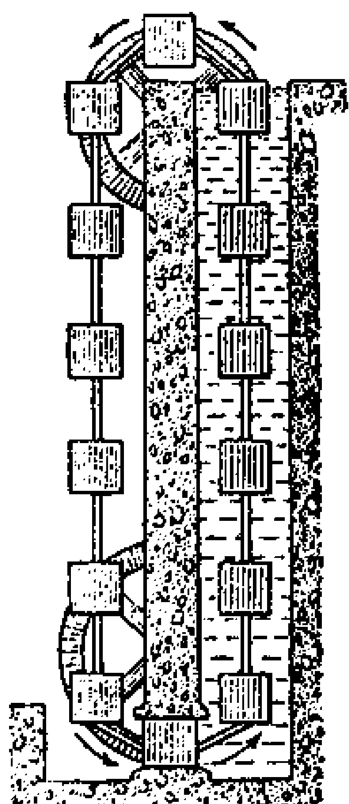


图 199　水塔的纵剖面图

力，也就是 1 三次方米水的重力乘上浸在水里的铁箱数。从图上可以看出，水里经常会有 6 只铁箱，这就是说把这些沉在水里的铁箱往上推的力是 6 三次方米水的重力，或 58 800 牛顿。铁箱本身的重力自然在把自己向下拉，但是挂在塔外绳索上的 6 只铁箱也在向下沉，所以两方面的力是平衡的。

这样，那条按照上面说的方式转动的绳索，经常在塔的里面维持着 58 800 牛顿向上的牵引力。显然，这个力会迫使绳索不停地在滑轮上滑动，这时它们每转一周所做的功是

$58800 \times 20 = 1176000$ 焦耳。

如果全国布满了这样的塔，我们就可以从它们那里得到无穷的功，这足够供给我们全国使用。这样的塔会转动发电机，使我们得到无穷尽的电能。

可是，我们如果仔细研究一下这个设计，就很容易看出，绳索完全没有动的可能。

为了使这根循环的绳索转动，必须让这些铁箱能够从下面进入水塔，从上面离开水塔。可是我们知道，铁箱在进入水塔的时候，必须克服 20 米高的水柱的压力！这个压在铁箱的每一平方米面积上的压力，不多不少，恰好是 19.6 万牛顿(20 三次方米水的重力)，而向上的牵引力却总共只有 5.9 牛顿，要用它来把铁箱拉到水塔里去，显然是不够的。

在那些不会成功的发明家们所设计的无数种水力“永动机”当中，也可以找到一些最简单而且最巧妙的设计。

请看图 200。把一只装在轴上的木制鼓形轮，一部分老是浸在水里。阿基米德的定律既然是靠得住的，那末，浸在水里的那



部分鼓形轮就会往上浮；而且，只要水的推力比轴上的摩擦力大，那鼓形轮就会不停止地转下去……

可是，且别忙着制造这样的“永动机”！你一定会失败的，鼓形轮不会转动的。为什么呢？我们的推理错在哪儿呢？原来我们忽略了作用力的方向了。这里的作用力永远是和鼓形轮的表面垂直的，也就是跟通往轮轴的半径方向相同。可是经验告诉我们，顺着轮子的半径施力，轮子决不会转。要它转就得顺着轮周的切线方向来施力。这样一说，就不难明白为什么这样的“永恒”运动也没有实现的可能了。

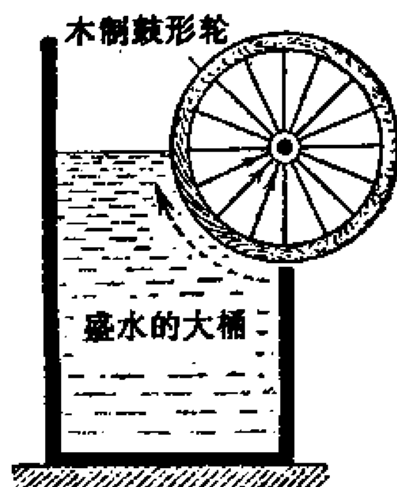


图 200　又一种水力永动机的设计

阿基米德的定律给了想发明“永动机”的人一种富于诱惑力的精神食粮，曾经鼓励他们千方百计去把看去像是失去的重力用来做机械能的永恒源泉。但是他们的尝试，没有一个是成功的，也永远不可能得到成功。

好像是一个简单的问题

在一个容得下 30 杯水的茶炊里装满水。把一个茶杯放在它的龙头下面，眼睛看着拿在手里的表，看表上的秒针走多少时间才能使茶杯装满水。假定是半分钟。现在要问：如果让龙头开着，要多少时间才能使茶炊里的水流完？

这好像是连小孩子都能解答的算术题目：流出一杯水需要半分钟，那末流出 30 杯水自然需要 15 分钟。

可是你试验一下看。试验的结果是：流完一茶炊水所需要的

时间不像你所想的那样是一刻钟，而是半小时。

这到底是怎么一回事呢?这算法其实是很简单的。

简单是简单，可并不见得对。千万别以为水从茶炊里流出来的速度自始至终是一样的。第一杯水从茶炊里流出来以后，水流受到的压力已经因为茶炊里的水位降低而减小了。显然，要把第二个杯子装满，就得用比半分钟更多的时间；装满第三杯，时间还要长些……

装在没有盖的容器里的任何一种液体，从孔里流出来的速度跟孔上面那个液体柱的高度成正比。伽利略的学生托里拆利首先说明了这个关系，并且用简单的公式把它表明出来：

$$v=\sqrt{2gh}$$

式子里，v 代表液体流出的速度，g 代表重力加速度，h 代表孔到液面的高度。从这个公式可以看出，液体流动的速度跟液体的密度完全没有关系：轻的酒精和重的水银在液面同样高的情况下，从孔里流出来的速度是相同的(图 201)。从这个公式又可以看出，在重力只有地球的 1/6 的月球上，流满一杯水所需要的时间，一定相当于在地球上所需要的时间的 $\sqrt{6}\approx 2.5$ 倍。

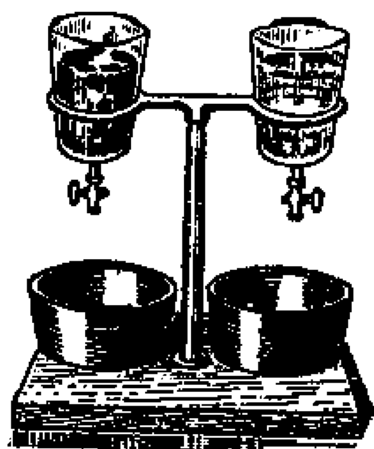


图 201　在液面同样高的情况下，哪一种液体流得更快些，是水银还是酒精

现在，让我们把话回到原来的问题上。如果茶炊里的水已经流出了 20 杯，里面的水面(从龙头的孔算起)降低到了原来的 1/4 的时候，那末装满第 21 杯水所需要的时间，就要相当于装满第一杯水所需要的时间的 2 倍。如果后来水面继续降低到原来的 1/9，那末装满下一杯水所需要的时间就要相当于装满第一杯水所需要的时间的 3 倍了。大家

知道，茶炊里的水快流完的时候，从里面流出来的水是流得多么缓慢啊！用高等数学可以解答这个问题：使一个容器完全流空所需要的时间，比同体积的液体在原来的水面不变的情况下完全流出所需要的时间增加一倍。

关于水槽的问题

从上面所讲的问题再进一步，就可以讲到那个大家都知道的、每一本算术习题集和代数习题集都要收集进去的水槽问题了。大家可能都记得这样一个古典的烦琐的问题：

“在一个水槽里装有两根自来水管。开第一根管子，可以在5小时里把水槽装满水；开第二根管子，可以在10小时里把满槽的水放完。如果同时开两根管子，问需要多少小时才能把这个空水槽装满水？”

这类问题已经有了很久的历史，第一个提出它的人差不多可以追溯到二千年以前的希罗。下面就是他所提的问题之一——这个问题比起他的后辈所提的确实要简单得多。

> 设有一个大水池，4个喷泉。
> 第一个喷泉一昼夜里把水池灌满。
> 第二个喷泉2天2夜才能把同样的工作做完。
> 第三个喷泉的能力只有第一个的1/3。
> 最后一个要干4昼夜才能灌满它。
> 请回答我，如果4个喷泉同时放水，
> 要多少时间才能把水池灌满？

人们解答这类水槽问题已经有二千年了，可是他们的解答也

错误了二千年，墨守成规的力量竟有这么大！为什么说是解答错了，你自己看了刚才谈过的茶炊流水问题以后，应该是会明白的。水槽问题一般是怎样解答的呢？例如第一个问题，是这样解答的：在一小时里，第一根管子能把水槽灌满 1/5，第二根管子把水漏去 1/10；就是说，在两根管子同时开放的时候，每小时实装进水槽里的水是 $\frac{1}{5}-\frac{1}{10}=\frac{1}{10}$，从这个式子就推算出装满水槽所需要的时间是 10 小时。但是这种推理是不正确的：即使水可以在不变的压力下均匀地流进水槽，但是它总是在水面越来越高的情况下不均匀地流出水槽的。所以我们决不能从第二根管子可以在 10 小时里流完水槽里的水这句话，就得出结论说，每小时可以流出 1/10 水槽的水。用小学的算术来解答这个问题，肯定是会算错的。初等数学既然不能解答水槽流水问题（涉及到流出水的），就不应该把这类算题收集在算术习题集里。

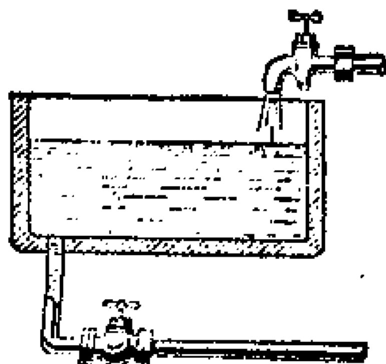


图 202　水槽问题

奇异的容器

能不能制造出这样一种容器，使流出的水不顾容器里面液体的面在逐渐降低，始终流出得很均匀而不会越来越慢呢？你读了前几节以后，也许会认为这是办不到的。

但是这是完全可以办到的。图 203 所画的瓶正是这样一种奇异的容器。这个容器是一个普通的窄颈瓶，通过它的塞子，插着



一根玻璃管。如果你把比玻璃管下端更低的龙头 C 开放，液体就会均匀地往外流，一直到容器里的液面降低到跟玻璃管下端相平为止。如果把玻璃管插到差不多齐龙头的地方，你就可以使全部液体均匀地从容器里流出，虽然这是一股很弱的水流。

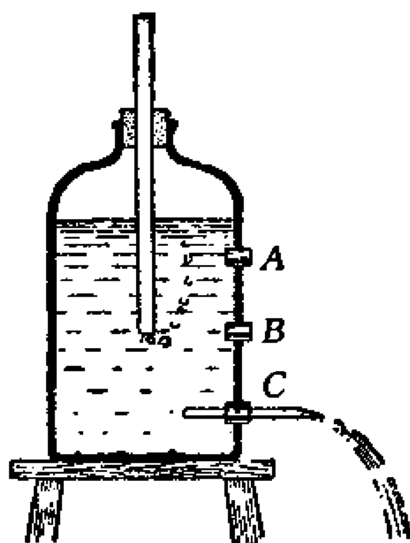


图 203　马里奥特容器的构造。孔里流出的水流得很均匀

这是什么缘故呢?让我们想一想，在龙头 C 开着的时候(图 203)，容器里会发生些什么情况?水向外流的时候，容器里的液面就会下降，外面的空气就通过玻璃管从水下面流进瓶里的稀薄空气里。气泡一个一个从水里冒上来，聚集在容器上部的水面上。这时候在 B 那么高的水平面上所受的压力等于大气的压力。也就是说，从龙头 C 流出的水，只是在 BC 那一层水的压力下往外流，因为容器内外的大气压力是可以相互抵消掉的。也因为 BC 那一层水的高度是不变的，所以从龙头 C 流出的水始终保持着同样的速度，是一点也不奇怪的。

现在请你回答一个问题：如果拔去跟玻璃管下端相平的塞子 B，那末水会流出得多快呢?

原来水完全不往外流(当然这只是在孔非常小，可以不予计算的时候才是这样。不然的话，水会在同孔的宽度一样厚的那一薄层水的压力下向外流)。事实上，这里的内外压力都跟大气压力相等，没有什么力能够迫使水向外流。

可是如果你把那个比玻璃管下端高的塞子 A 拔出来，那就不但没有水从容器里流出，外面的空气还会从这里流进容器里。为什么?原因很简单：在容器这一部分里，空气的压力比外面的大气压力要小。



有这种特别性质的容器是物理学家马里奥特想出来的，所以就叫做“马里奥特容器”。

空气的压力

在17世纪中期，累根斯堡的居民曾经看到过一件奇事：16匹马有8匹拉向一边，8匹拉向另一边，用尽全力也没把彼此合在一起的两个铜制的半球拉开来。是什么力量使它们合得这样紧呢？“没有什么”，是空气。市长奥托·冯·格里凯就这样让大家亲眼看到了空气并不是“没有什么”，而是有重力并且能对地面上所有物体施加很大的压力。

这个试验是在1654年5月8日举行的。

关于著名的“马德堡半球”实验，物理学教科书里都有叙述。但是我还是相信，读者如果能从格里凯本人嘴里听到这个故事，一定会更有趣味。叙述他的实验的这一本书篇幅很大，是用拉丁文写的，1672年在阿姆斯特丹出版。同那个时代所有的书一样，这本书的书名很长。

这本书的第23章专讲这个实验。让我们直译几段出来：

奥托·冯·格里凯
在无空气空间里
进行的所谓新的马德堡实验
实验最初是由维尔茨堡大学数学教授卡斯柏尔·萧特规划的。
著者自己出版，是内容最详细的版本，并附有各种新实验。

证明空气的压力能够把两个半球紧压得甚至连16匹马都不能拉开它们的试验。



我定做了两个铜制的半球，直径是3/4马德堡肘[1]，可是实际上只有67%肘，因为工匠一般都不能精确地按照需要的尺码做出活来。两个半球倒能够完全吻合。在一个半球上装了一个活栓，通过这个活栓可以抽掉球里的空气，并阻止外面的空气钻进球里去。此外，在两个半球上还安了4个环，环上穿着绳子，绳子缚在马的驾具上。我又叫人缝了一个皮圈，把皮圈放在蜡和松节油的混合物里浸透。把皮圈紧夹在两个半球的中间以后，空气就一点也不会漏进球里去了。活栓接上抽气筒的管子，把球里的空气抽出来。这时候可以看出，两个半球是用多大的力量通过皮圈紧紧粘附在一起的。外面空气的压力把它们压得这样紧，连16匹马(拼命挣扎着)都不能把它们拉开，或者只有费了很大的劲才能拉开它们。当马用尽了全力把两个半球最后拉开的时候，还发出了很大的响声，像放炮一样。

可是只要把活栓转一下，使空气能够流进球里去，两个半球就很容易被手拉开。

简单的算法能够告诉我们，为什么要用这样大的力量(每一边8匹马)才能把一个空球分开。空气的压力作用在每平方厘米上大约是9.8牛顿，直径36.85厘米(0.67肘)的圆的面积[2]等于1065平方厘米。这就是说，大气加在每一个半球上的压力在10 446.5牛顿(约1吨)以上。每一边都应该用这么大的力来拉，才能抵消掉球外空气的压力。

看起来这个力对每一边8匹马说来好像并不很大。可是不要

---

〔1〕一个“马德堡肘”等于550毫米。

〔2〕这里所以用圆的面积，而不用半球的表面面积，是因为大气的压力只有在跟表面垂直作用的时候，才会有上面所说的数值；对斜的表面来说这种压力就比较小。这里我们所用的是球的表面投在平面上的正射影，也就是大圆的面积。

忘记，平常马在拉1吨重的货物的时候，所要克服的力并不是1吨，而是比1吨小得多，只是车轮和轮轴之间、车轮和道路之间的摩擦力。这种摩擦力，譬如在公路上，不过是货物重的5%，也就是1吨货物的摩擦力约500牛顿(即约只有50千克力。实践告诉我们，8匹马一起拉货的时候要损失拉力一半，这一点我们在这里不谈)。因此，8匹马拉1吨重的货物相当于拉20吨重的一辆货车。你看马德堡市长的马所要拉的这个空气的力有多么大！它们好像是在拉着一台不在轨道上的小火车头。

曾经测量过，壮健的驮马拉货车的时候所用的力不过784牛顿(80千克力)[1]。所以为了拉开马德堡半球，在平稳的拉曳情况下，每一边得用1000÷80=13匹马[2]。

读者如果知道我们骨骼的某些关节所以不会脱落，同马德堡半球不容易分开有同样的原因，你一定会觉得惊奇的。我们的髋部关节正是这样的马德堡半球。如果把连在这个关节上的肌肉和软骨都去掉，大腿还是不会掉下来，大气压力把它们压在一起了，因为关节之间的间隙是没有空气的。

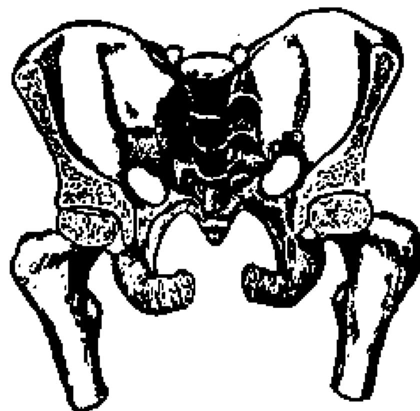


图204　我们髋部关节上的骨骼所以不会脱开，同马德堡半球一样，是由于大气的压力。

---

〔1〕这是速度在4公里每小时的时候所用的力。平均说来，马的拉力等于它的体重的15%；马的体重轻的大约是400千克，重的有750千克。在极短的时间里(刚用力的时候)拉力要大好几倍。

〔2〕为什么每边得用13匹马，读者可以参看我所著的《趣味力学》第一章“两匹马的题目”一节。



新式的希罗喷泉

读者们大概都知道一种普通形式的喷泉，这种喷泉相传是古代的力学家希罗设计的。我在这里先谈一下它的构造，然后再谈这种有趣装置的新的形式。希罗喷泉(图 205)是由三个容器组成的，上面一个是没有盖的碟子(*a*)，下面两个是密闭的球(*b* 和 *c*)。这三个容器用三根管子连了起来，连接的方法见图。在碟子 *a* 里装着一些水、球 *b* 里装满水、球 *c* 里装满空气的时候，喷泉就开始起作用了：水沿着管子从 *a* 流到 *c*，把 *c* 里的空气排到球 *b* 里；球 *b* 里的水受到进来的空气的压力，就沿着管子往上冒，在容器 *a* 上形成喷泉。到球 *b* 里的水流完为止，也就是说它里面的水全部流进了球 *c* 里的时候，喷泉就停止喷水了。

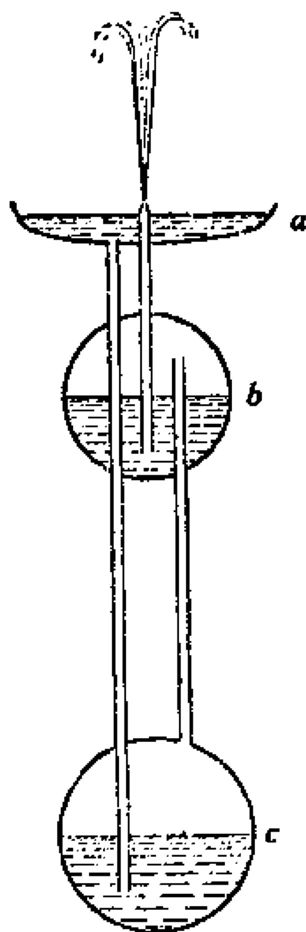


图 205　老式的希罗喷泉

这就是希罗喷泉的老的形式。在今天，一位意大利学校教师已经改造了这种喷泉。这位教师由于自己的物理实验室设备太少，不得不运用自己的创造性来简化希罗的喷泉装置，结果他想出了一种用最简单的设备来制造新喷泉的方法。在新装置里，药瓶代替了球形容器，橡皮管代替了玻璃管或金属管。上面那个容器也不一定要穿孔，只要像图 206 的上图所画的那样，把橡皮管的一端放在里面也成。

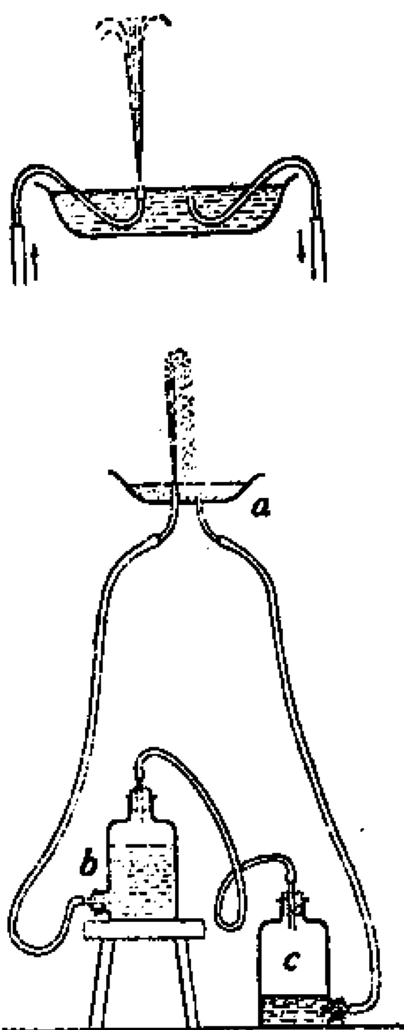


图 206　改造以后的新式希罗喷泉。上图是碟子的另一种形式

经过这样改造以后的仪器，使用起来就十分方便：当瓶 b 里的水经过碟 a 全部流进了瓶 c 的时候，只要简单地把 b、c 两个瓶子换一下位置，喷泉就会重新喷水；不过不要忘记，同时也要把喷嘴移到另一条管子上去。

改造以后的喷泉还有一种方便的地方，就是使我们有可能任意变动容器的位置，来研究各个容器的水面之间的高度差对水流喷射高度的影响。

如果你想把喷泉的喷射高度加大好几倍，只要把这个装置下面的两个瓶里的水换成水银，空气换成水，同时把喷嘴移一下(图 207)就可以做到。这个装置所起的作用是容易明白的：水银从瓶 c 流进瓶 b 的时候，就把瓶 b 里的水排出去，造成喷泉。水银的密度是水的 13.5 倍，我们知道了这点就可以算出，这时候的喷泉可以喷多么高。让我们用 h_1、h_2、h_3 来表示各个液面之间的高度差。现在我们可以研究一下瓶 c 里的水银是用多大的力在向瓶 b 流去的。两瓶之间的连接管里的水银受到了两方面的压力。在右面对它起作用的是 h_2 的这么一段水银柱的压力(这个压力等于 $13.5h_2$ 这么高的水柱的压力)，加上 h_1 这么高的水柱的压力。在左面起作用的是 h_3 这么高的水柱的压力。总起来看，水银所受的压力等于这么高的水柱的压力：



$$13.5h_2 + h_1 - h_3$$

但是，$h_3 - h_1 = h_2$，所以我们可以用 $-h_2$ 来代替 $h_1 - h_3$，上面那个式子就变成

$$13.5h_2 - h_2$$

也就是 $12.5h_2$。这样看来，水银压进瓶 b 里去的压力是一根高达 $12.5h_2$ 的水柱的重力。从理论上来说，喷泉喷射的高度应该等于两个瓶里的水银面的高度差的 12.5 倍。但是摩擦力会把这个理论上的高度稍微降低一些。

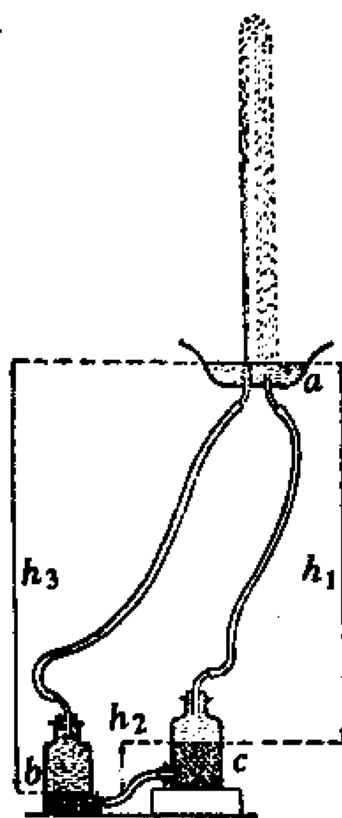


图 207　在水银的压力作用下的喷泉。喷泉的高度大约等于两个瓶里水银面的高度差的10倍

虽然是这样，这个装置仍旧使我们有可能得到很高的喷射水流。譬如说，为了使喷泉达到 10 米的高度，只要把一个瓶移到比另一个瓶大约高 1 米的位置就够了。奇怪的是，从我们的计算可以看出，碟 a 离水银瓶的高低对水流的高度一点没有影响。

戏弄人的容器

在古时候——十七八世纪——有些贵族用下面所讲的那种有科学意义的玩具来取乐：准备一只壶形杯——在这种杯的上部刻有一些像花纹一样的切口（图 208），在杯里装上酒。把酒给身分比较低的客人喝，尽情地同他们开玩笑。怎样喝这种壶形杯里的酒呢？不能把杯子斜过来：因为酒会从许多切口里流出来，一滴

也不能喝到嘴里。这时候发生的情况，正像童话里所说的那样：

我也曾经在那里，
喝那蜂蜜酿的酒；
顺着胡子往下流，
可一滴也没到嘴。

可是知道这种构造的秘密——图 208 的右图指出了这个秘密——的人，只要用手指按住孔 B，再把嘴凑在壶嘴上吸，那不



图 208　18 世纪末的骗人的壶形杯和它的构造上的秘密

必把杯子斜过来，就可以把酒吸到嘴里。原来酒会经过孔 E 沿着壶柄里的一条沟和这条沟的延长部分 C(这一部分在壶口的边缘里面)来到壶嘴里。

水在底朝天的玻璃杯里有多重

“当然一点重力都没有，因为水不能留在这样的杯子里，它会流掉。”你说。

“如果它不流掉，那该有多重呢?”我问。



事实上是可以使水留在底朝天的杯子里而不让它流掉的。图 209 所画的就是这种情况。一个倒过来的盛满水的玻璃高脚杯，它的底缚在天平的一个盘上，在这个杯里的水不会流掉，因为杯子的边缘是浸在一个有水的容器里的。在天平的另一个盘上放着一个相同的空的玻璃高脚杯。

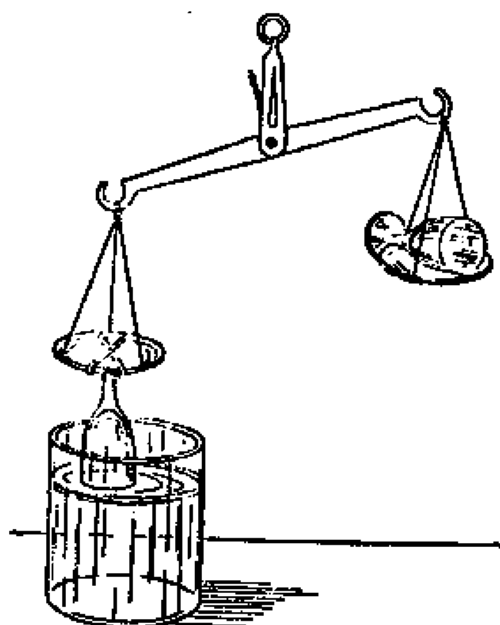


图 209　哪个天平盘比较重些

那末哪一个天平盘比较重呢?

那个缚着底朝天的盛着水的高脚杯的天平盘比较重些。这个杯子上面受着整个大气压力，而下面的大气压力却要减掉杯里所盛的水的重力。

为了使两个天平盘平衡，必须把放在另一个盘上的杯子也装满水。

可见在上面说的条件下，那个倒过来的杯子里的水的重力跟正立着的杯子里的水的重力是相同的。

轮船为什么会互相吸引

1912 年秋天，远洋航轮“奥林匹克”号——当时世界上最大的轮船之一——出了这样一件事。“奥林匹克”在大海上航行着，同时在离它 100 米远的地方，有一艘比它小得多的铁甲巡洋舰“豪克”号几乎跟它平行地疾驶着。当两艘船到了像图 210 里所画的位置的时候，发生了一件意外的事情：小船好像是服从着

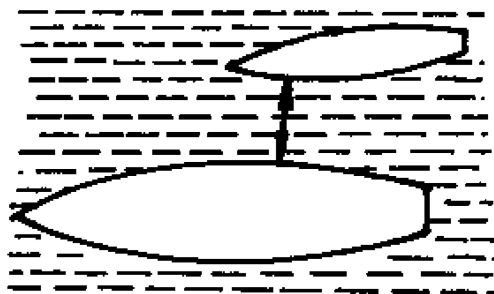


图 210 “奥林匹克”号和“豪克”号在相撞前的位置

一种不可见的力量，竟扭转船头朝着大船，并且不服从舵手操纵，几乎笔直地向大船冲来，结果发生了撞船事故。“豪克”号的船头撞在“奥林匹克”号的船舷上。这次撞击非常剧烈，以致“豪克”号把“奥林匹克”号的船舷撞了一个大洞。

在海事法庭审理这件奇案的时候，大船“奥林匹克”号的船长被判做过失的一方，因为——法院的判决书说——他没有发出任何命令给横着开来的“豪克”号让路。

可见，法院在当时一点也没有看出任何异常的事情来：没有别的，只是船长调度失当。其实这里却发生了一个完全不能预料的情况：船在大海里发生了互相吸引的事故。

这样的事故，以前在两艘船平行前进的时候大概也发生过许多次。可是在还不能建造很大的船的时候，这种现象也显得并不严重。只是在最近这些年里，海洋里航行着许多“漂浮的城市”以后，船的吸引现象才十分显著起来。在海军操演的时候，舰队司令员也很重视这种现象。

在大轮船或军舰旁边驶过的小船所出的许多事故，大概都是同样的原因引起的。

那末怎样来解释这种吸引的现象呢？当然，这里是谈不上按照牛顿的万有引力定律而出现的引力的。这种我们在第四章里已经说过的引力在这里是太小了。这种现象完全有别的原因，得用液体在管子里和



图 211 在沟的狭窄部分，水流得比宽的部分快，而压向沟壁的力却比较小



沟里的流动原理来解释它。可以证明，如果液体沿着一条有宽有窄的沟向前流动，那末在沟的狭窄部分它就会流得快些，并且压向沟壁的力也比宽的部分小些；而在宽的部分，它就要流得慢些，并且压向沟壁的力也比较大些(这就是所谓伯努利原理)。

这个原理对于气体也是正确的。在关于气体的学说里，这种现象常常叫做“气体静力学的怪事”。据说，下面就是人们第一次偶然发现这种现象的经过。在法国一座矿山里，一个工人奉命把那个和外坑道相通的孔用护板遮蔽起来，这个外坑道是向矿井里输送压缩空气用的。这个工人和冲入矿井里的气流斗争了很久，却不能把它遮上；可是突然间，护板自己砰的一声关上了，关的力竟是这样大，如果不是护板够大的话，它可能和大吃一惊的工人一起被拉进通风道里去。

顺便说起，气流的这种特性也可以用来解释喷雾器的作用。当我们吹一个一头是细管的横管的时候(图212)，空气在细管里就会减小自己的压力。这样直管上面就出现了压力比较小的空气。结果大气压力就把杯子里的液体沿着直管压上来；液体到了管口，落在吹来的气流里，变成雾的形状散播在空中。

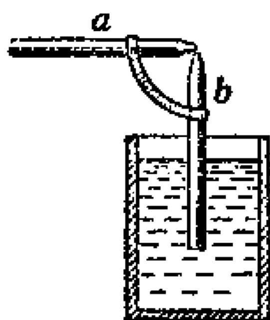


图212　喷雾器

现在我们就不难明白两艘船之间所以会有引力的原因了。当两艘轮船平行地航行着的时候，在它们的船舷中间就好像有了一条沟。在普通的沟里，沟壁不动，水在动；这里却相反，是水不动，沟壁在动。不过从这里产生的力的作用却一点没有改变：在这条能动的沟的狭窄部分，水对沟壁所施的压力比它对轮船周围空间所施的压力要小。换句话

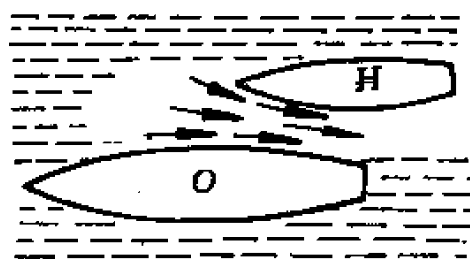


图213　两艘在行驶的船之间的水流

说，两艘轮船的相对两侧从水里受到的压力比两船外侧部分受到的压力要小。这会产生什么样的后果呢?船在外侧的水的压力下一定会相向运动，而比较小的船只自然会移动得显著些，比较大的船几乎仍旧留在原处，一点也没有移动。这就是为什么大船很快地在小船旁边驶过的时候会出现特别强大的引力的缘故。

可见船只之间的引力是由流水的吸引作用造成的。急流对于洗澡的人的危险，漩涡的吸引作用，都可以用这个来解释。

可以算出，河里的水流在用 1 米每秒的普通速度前进的时候，就有 30 牛顿的力在吸引着人的身体!受到这种力吸引的人是不容易站住的，特别是在水里，当我们身体本身的重力不能使自己保持稳定的时候。最后，大家知道在飞速前进中的火车也有吸引作用：在用 50 公里每小时的速度前进的时候，它要用大约 80 牛顿的力吸引站在车旁的人。这也可以用伯努利原理来解释。

和伯努利原理有关系的现象虽然常常出现，但是一般人对于它的原理却知道得很少。所以把它详细地解释一下是有好处的。

下面我要从一本普及科学杂志所载的关于这个题目的通俗论文里摘录几段，来供大家研究。

伯努利原理和它的效果

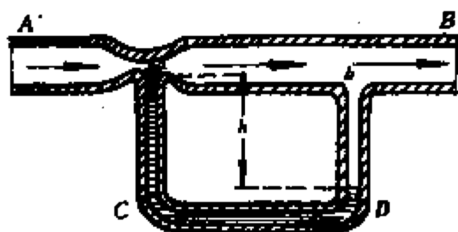


图 214 伯努利原理的图解。管子 *AB* 的狭窄部分(*a*)的压力比宽阔部分(*b*)的小

丹尼尔·伯努利在 1726 年首先提出的原理的内容是：在水流或气流里，如果速度小，压力就大，如果速度大，压力就小。这个原理也有一定的限制，但是在这里我们不谈它。

图 214 说明了这个原理。



向 AB 管吹进空气。如果管的切面小(像 a 处)，空气的速度就大；而在切面大的地方(像 b 处)，空气的速度就小。在速度大的地方压力小，速度小的地方压力大。因为 a 处的空气压力小，所以 C 管里的液体就上升；同时 b 处的比较大的空气压力使 D 管里的液体下降。

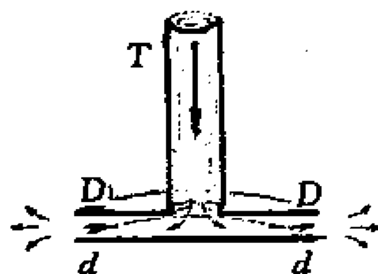


图 215　用圆盘做的实验

在图 215 中，T 管是固定在铜制的圆盘 DD 上的；空气从 T 管里出来以后，还要擦过另外一个跟 T 管不相连的圆盘 dd。[1]两个圆盘之间的空气的流速很大，但是这个速度越接近盘边降低得越快，因为气流从两盘之间流出来，切面在迅速加大，再加上惯性在逐渐被克服，但是圆盘四周的空气压力是很大的，因为这里的气流速度小；而圆盘之间的空气压力却很小，因为这里的气流速度大。因此圆盘四周的空气使圆盘互相接近的作用比两圆盘之间的气流要想推开圆盘的作用大；结果是，从 T 管里吹出的气流越强，圆盘 dd 被吸向圆盘 DD 的力也越大。

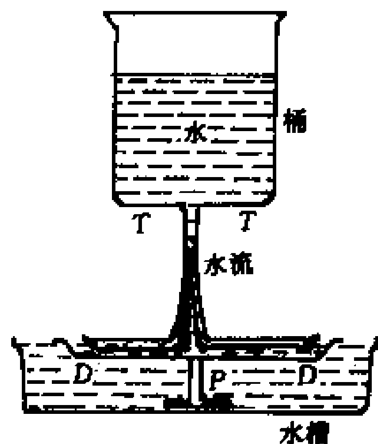


图 216　当水桶 TT 里的水流到圆盘 DD 上的时候，在轴 P 上的圆盘就会升起

图 216 和图 215 相似，所不同的只是用了水。如果圆盘 DD 的边缘是向上弯曲的，那末在圆盘 DD 上迅速流动着的水会从原来比较低的水面自己上升到跟水槽里的静水面一般高。因此圆盘下面的静水就比圆盘上面的动水有更高的压力，结果就使圆盘上升。轴 P 的用途

〔1〕同样的实验如果用线轴和圆纸片来做，就会更简易些。为了使圆纸片不滑向一旁，可以用大头针穿过线轴的槽，把纸片钉住。

是不让圆盘向旁边移动。


图 217　被气流支持着的小球

图 217 画的是一个飘浮在气流里的很轻的小球。气流冲击着小球，不让它落下来。当小球一跳出气流，周围的空气就会把它推回到气流里，因为周围的空气速度小，压力大，而气流里的空气速度大，压力小。

图 218 中的两艘船在静水里并排航行着，或者是并排地停在流动着的水里。两艘船之间的水面比较窄，所以这里的水的流速就比两船外侧的水的流速高，压力比两船外侧的小。结果这两艘船就会被围着船的压力比较高的水挤在一起。海员们都很知道两艘并排驶着的船会互相强烈地吸引。

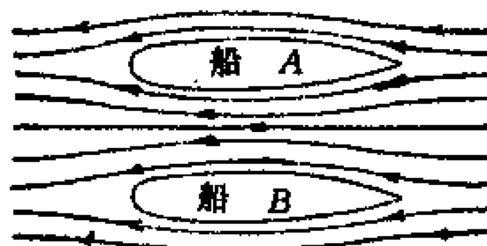


图 218　两艘平行前进的船，好像会互相吸引

如果两艘船并排前进，而其中一艘稍微落后，像图 219 所画的那样，那情况就会更加严重。使两艘船接近的两个力 F 和 F，会使船身转向，并且船

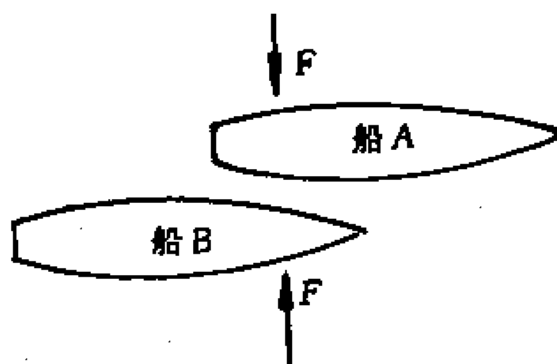
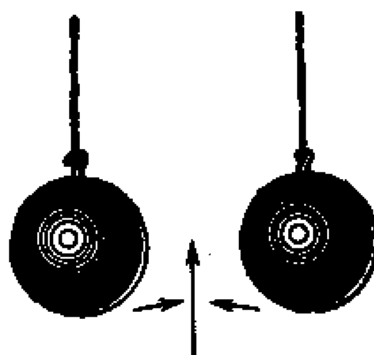


图 219　在两艘船前进的时候，船 B 会转过头来向船 A 撞去


图 220　如果向两个很轻的球中间吹气，它们就会互相接近，甚至相撞

B 转向船 *A* 的力更大。在这种情况下，撞船是免不了的，因为舵已经来不及改变船的方向。

在图 218 中所说的这种现象，可以用下面的实验来说明。把两个很轻的橡皮球照图 220 那样吊着。如果你向两球中间吹气，它们就会彼此接近，并且互相碰撞。

鱼鳔是做什么用的

关于鱼鳔的作用问题，一般的说法听起来好像是可以相信的。这种说法是，在鱼想从深水里浮到水的上层来的时候，它就鼓起自己的鳔；这时候鱼的体积就增大，使被排开的水的重力大过自己的体重——于是按照浮体原理，鱼就升到水面。如果它不想再上升，或者想下沉，那它就相反地压缩自己的鳔。这时候鱼的体积和它所排开的水的重力就会减小，鱼也像阿基米德原理所说的那样，沉到了水底。

关于鱼鳔功用的这种简单概念，是从 17 世纪佛罗伦萨科学院的科学家们开始的，正式提出它的人是波雷里教授，时间在 1685 年。在以后 200 多年里，对于这种说法没有人表示过异议，同时也在学校教科书里生了根。一直到经过新的研究家仔细研究以后，才发现这个理论是毫无根据的。

毫无疑义，鱼鳔对鱼的浮沉有极密切的联系，因为失去了鳔的鱼——它的鳔在实验的时候被取掉了——只有在鳍加紧摇动的情况下，才能浮在水里；鳍一停止，它就沉到水底去了。那末鱼鳔的真正功用是什么呢？十分有限：只是帮助鱼留在某一个一定的深处——就是留在鱼所排开的水的重力等于它本身的重力的那个水平上。当鱼用鳍使自己下沉到比这个水平更低的时候，它的身体由于经受着从水那一方面来的很大的外来压力，就要缩小，

并且对鳔施加压力。这时候被鱼排开的水的体积减小了，被排开的水的重力也变得比鱼的体重小了，于是鱼就不可避免地要往下沉。它下沉得越低，水的压强就越大(每下沉 10 米，水的压强要增加 1 个大气压)，鱼的身体就被压缩得越小，也就更要继续往下沉。

在鱼离开原来已经取得平衡的那个水平，而用鳍的力使自己升到更高的水平的时候，也会出现同样的情况，只是朝着相反的方向。鱼的身体摆脱了一部分外来的压力以后，鱼鳔要从里面把它撑大起来(鱼鳔里的气压在这以前是和周围的水压平衡的)，体积增大了，也就向高处浮了起来。鱼升得越高，它的身体就胀得越大，也因而越要继续往上升。鱼是不能用“压缩鱼鳔”的方法来阻止这种趋势的，因为鱼鳔的壁上并没有能够主动改变自己体积的肌肉纤维。

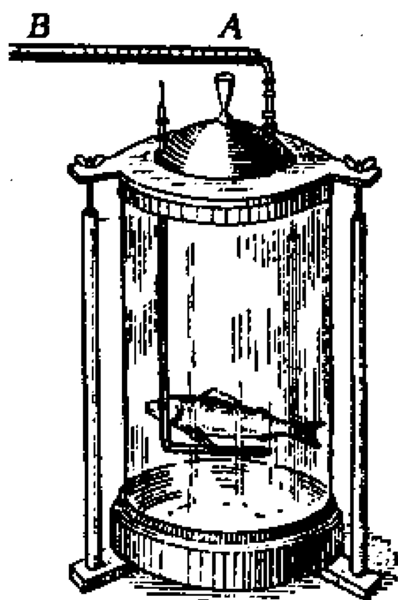


图 221　用鲤鱼做的实验

我们所以说鱼真的是这样被动地扩大体积的，可以用下面的实验来证明(图 221)。把一条用氯仿麻醉过的鲤鱼放在一个盛着水的密闭的容器里，容器里维持着同天然水池一定深处的压力相接近的高压。这时候鱼会肚子朝天一动不动地卧在水面上。如果把它稍微浸得深一些，它就要重新浮到水面上来。如果把它放在离容器底比较近的地方，它就会往容器底里沉。但是在这两个水平之间的一层水里，鱼却可以保持平衡状态，不浮也不沉。所有这些现象，只要回想一下刚才讲过的鱼鳔的胀缩是被动的，就可以明白了。

所以，跟流行的说法相反，鱼是根本不会胀大和缩小自己的鳔的。鱼鳔体积的改变是被动的，是在外部压力增强或减弱的作用下进行的(按照波义耳—马略特定律)。这种体积的改变对鱼说来，不但没有好处，相反地替它招来了害处，因为它会使鱼不得



不越来越快地沉到水底去，或是越来越快地升到水面上来。换句话说，鱼鳔能帮助鱼在不动的时候保持平衡，但是这个平衡是不稳定的。

捕鱼人观察到的情况可以证明这种说法。在深海里捕鱼的时候，常常可以看到有些鱼在半途中脱逃了，可是和人们的想法相反，它们并不重新沉入它们被捕的深水里，而是急速地上升到水面上来。这样的鱼，有时又可以看到它们的鳔已经突出到嘴外面来了。

对鱼的浮沉来说，鱼鳔的真正功用就是这样。至于它在鱼的身体里是不是还起着别的作用，而这又是些什么样的作用，在目前都还不知道，所以这个器官在目前还是一个没有猜破的谜。在现在可以算是完全解释明白了的，只是它在流体静力学方面的作用。

波浪和旋风

有许多日常物理现象，都是不能用物理学上的简单的原理来解释的。甚至像有风的日子里在海洋上常常看到的波浪现象，也不可能在中学的物理教科书里详细解释明白。轮船在航行的时候，从船头散向平静的水里的波浪是怎样引起的呢?旗在刮风的时候为什么会飘得那样急呢?海岸上的细沙为什么会排列得像波浪一样呢?从工厂的烟囱里冒出来的烟为什么会成一团一团的呢?

要明白这些以及其他和这类似的现象，必须懂得液体和气体的所谓涡流运动的特点。在这里让我们略微多讲一些涡流现象，并且指出它们的主要特点来，因为在学校教科书里这种现象几乎是不讲的。

设想在管子里流着一种液体。假使液体里的所有微粒在管子里都是顺着一些平行线前进的，那么在我们面前就是一种最简单

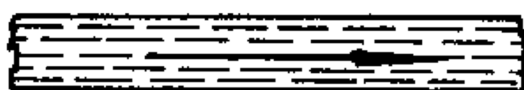


图 222　液体在管子里平静地流着(片流)



图 223　在管子里的液体的涡流

的液体运动形式——平静的流动或者像物理学家所说的“片流”运动。

可是这并不是最常见的现象。相反，液体在管子里的不平静的流动却是最常见的现象，有许多涡流要从管壁流向管轴。这就是所谓涡流运动，也叫湍流运动。譬如自来水管里的水就是这样流动的(细的水管除外，细管里的水是片流的)。一种液体在一定粗细的管子里的流动速度达到一定大小的时候，也就是达到所谓临界速度的时候[1]，总会有涡流发生的。

如果我们让一种透明的液体流过一根玻璃管，在液体里放一些非常轻的粉末，例如石松子粉，我们就可以用眼睛看到在管子里流着的液体的涡流了。这时候从管壁向管轴行进的涡流可以看得非常清楚。

涡流的这种特点，在制造冷藏器和冷却器的技术上都要利用。在管壁冷却着的管子里，有涡流的液体一定会使所有液体接触冷却壁比没有涡流的液体快。应当记住，液体本身是不大容易传热的，如果不去搅拌它们，它们的冷却或增加温度都非常慢。血液和它所流过的各个组织之间所以能够那样快地交换热和物质，也就是因为血在血管里的流动不是片流而是涡流的缘故。

上面对管子所说的一切，同样能适用在露天的沟道和河床上：在沟和河里，水流也是涡流前进的。在精确测量河流速度的时候，仪器会出现一种脉动现象，特别是在靠近河底的地方：脉动现象表明着水流在经常改变方向，也就是在形成涡流。河水不

〔1〕任何液体的临界速度跟液体的粘滞性成正比，跟液体的密度和它流过的管子的直径成反比。



但沿着河床前进，像平时想象的那样，同时还要从河岸流向河中央。因此说在河的深处水的温度一年四季都是相同的(总是4摄氏度)，这种说法是不正确的，因为在靠近河底流动着的水的温度，总是在被搅和着，使得跟河面上的温度一样(湖里的情况不是这样)。

在河底附近形成的涡流会带动轻沙，使河底出现沙“波”。同样的沙波也可以在波浪所能淹到的海边沙岸上看到(图224)。如果靠近水底的水流是平静的，那末海底的沙面就会是平滑的了。



图224 海岸上由于水的涡流作用而形成的沙波

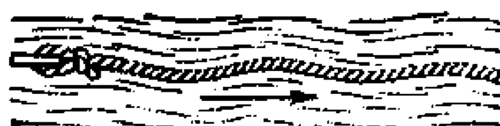


图225 绳在流水里的波状运动是涡流引起的

这样说来，在被水冲过的物体的表面附近是会出现涡流的。关于这一点，可以拿顺着流水放的绳索会曲折成蛇形这一个例子来说明(把绳的一头系住，另一头让它自由漂在流水里)。为什么会这样呢?在绳的某一段附近出现涡流的时候，这一段绳就会被涡流带过去；可是过一会，另一个涡流又使这一段绳发生相反的运动。结果，绳就曲折成蛇形了(图225)。

现在我们要从液体转到气体，从水转到空气了。谁没有见到过旋风从地面上卷起尘土、稻草等东西呢?这就是说沿着地面出现了空气的涡流。当空气沿着水面运动的时候，在形成旋风的地



图226 沙漠里的波状沙面

方，由于空气压力已经降低，水也就会升高起来，引起波浪。由于同样的原因，在沙漠里，沙丘的斜坡上也会产生沙波(图 226)。

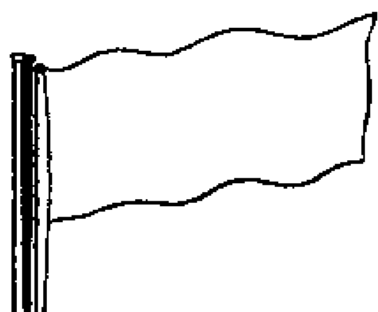


图 227　迎风飘扬的旗帜

现在就很容易明白，旗为什么会在风里飘扬(图 227)：旗在这里遇到的情况正同绳在流水里遇到的一样。风信旗的硬片在风里不能保持固定的方向，却要随着涡流总是摇摆不停。从工厂的烟囱里冒出的烟是一团一团的，也是同样的原因：炉子里的气体流过烟囱的时候也是作着涡流运动的。在烟离开烟囱以后，因为惯性关系，这种运动还要继续一些时候(图 228)。

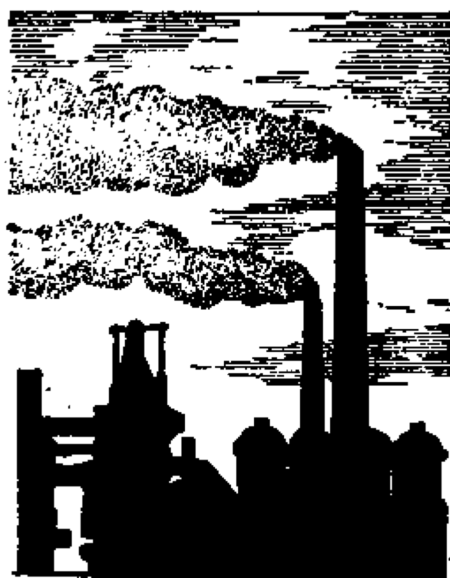


图 228　从工厂的烟囱里冒出来的一团团的烟

空气的涡流运动对于飞行也有很大的意义。飞机的翼有特别的形状，机翼下面由制成机翼的材料把空气稀薄的部分填充了，而机翼上

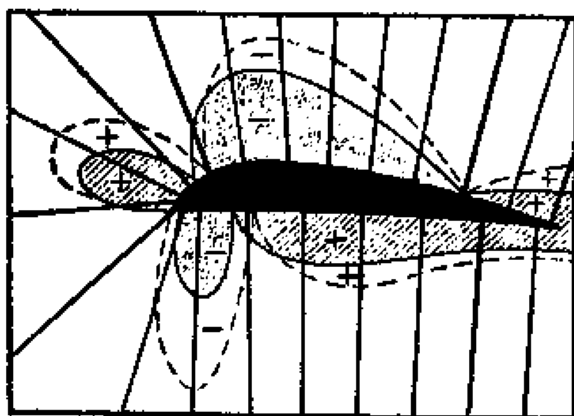


图 229　什么力支托着机翼。根据最新实验测定，翼面空气的高压区(+)和低压区（-）是这样分布的。由于所有支托力和吸引力作用的结果，机翼就上升了。实线表示压力的分布，虚线表示在飞机飞行速度急剧增高时候的压力的分布



面的涡流作用却被加强了。结果机翼从下面得到了支托力，而从上面得到了吸引力(图 229)。鸟类展开翅膀飞翔的时候，也有类似的现象。

在风吹过屋顶的时候是起着怎样的作用的呢?空气的涡流在屋顶上面造成了一个空气稀薄的区域，屋顶下的空气为了要平衡这个压力，就向上压，把屋顶掀了起来。结果就使人们常常看到一种可悲的现象：有些轻的钉得不牢的屋顶被风刮了去。由于同样原因，大的窗玻璃在刮风的时候也会从里往外被压碎(不是从外往里被压碎)。不过这些现象也可以用流动着的空气里压力减小的道理来解释(参看第 348 页所讲的“伯努利原理”)，比较简单些。

当温度和湿度都不同的两个气团彼此贴着流过的时候，每一个气团里都会产生涡流。云的各种各样的形状大半也是这个原因造成的。

你们看，同涡流有关的现象的范围竟有多么广!

在地心里旅行

地球的半径大约等于 6 400 公里，可是还没有一个人到过地面 3.3 公里以下的深处。要到达地球的中心还有很长一段路。虽然这样，富于幻想的儒勒·凡尔纳却让自己小说里的两个主人公——怪教授黎登布洛克和他的侄儿阿克赛——下降到地心里去。在《地心游记》那部小说里，他写了这两位地下旅行家的惊人冒险的故事。他们在地下遇到的意外事件当中，有一件就是空气的密度增大。空气是随着高度的增加而越来越快地稀薄的：在它的高度按照算术级数增加的时候，它的密度是按照几何级数减小的。反过来，在向海平面以下的地方下降的时

候，空气在上层空气的压力下，就应当变得越来越密实。这一点，这两位地下旅行家当然是不会不注意到的。

下面是叔侄二人在地下48公里处的谈话。

“看一下，气压计指在什么地方了？”叔父问。

“压力高极了。”

“现在你看出，我们慢慢地下降，就会逐渐习惯浓密的空气，一点也不觉得难受的。”

“只是耳朵有些痛。”

“这算不了什么！”

“你说得对，”我不打算同叔父争论，就这样回答，“在浓密的空气里还觉得很愉快呢。你听，这里的声音是多么响亮啊！”

“当然喽，在这种空气里就是聋子也能听见。”

“但是，空气要变得越来越密。到最后，它不会同水一样密吗？”

“当然会的，在770个大气压下就会是这样。”

“再往下降呢？”

“密度还会再增加。”

“那末这时候我们怎样下去呢？”

“可以在口袋里装些石头。”

“嘿！叔叔，您总是有办法的！”

我不再想猜测什么了，因为我怕再想出些什么阻碍旅行的话来，也许会使叔父生气。可是有一件事非常明显，就是在几千个大气压下，空气可能会变成固体，到那时候就算人受得住这种压力，我们也只好停止前进。这却不是什么争论可以解决的。



幻想和数学

以上是这位小说家告诉我们的话。如果我们检验一下这段对话里的事实，却可以发现这只是些没有根据的幻想。我们不必到地心里去查究这件事情；我们只须预备一支铅笔和一张纸，到物理学领域里做一次小小的旅行。

首先让我们算一下，必须下降到多么深，气压才能增加1/1000。正常的气压等于760毫米水银柱的重力。假如我们不是住在空气里，而是住在水银里，那末我们只要下沉$\frac{760}{1000}=$ 0.76毫米，就可以使压力增高1/1000。在空气里，我们当然要下降得更深一些，深度增加的倍数，应当是水银比空气重的倍数，也就是10 500倍。所以要使压力比正常气压增加1/1000，我们下降的深度就不会像在水银里那样只下降0.76毫米，而是要下降0.76毫米×10 500，也就是差不多8米。当我们再下降8米的时候，压力又会增大自己的数值的1/1000，依此类推。[1]总之，我们无论是在哪个高度上——在人类上升的最高限上也好(22公里)，珠穆朗玛峰的顶上也好(9公里)，在海平面上也好——都必须下降8米才能使气压比原来的数值多1/1000。因此，我们就得到这样一个关于空气压强随着深度的增加而增长的表：

在地面上，压强=760毫米水银柱=正常气压

在地面下8米深处的压强=正常气压的1.001倍

在地面下2×8米深处的压强=正常气压的$(1.001)^2$倍

---

[1] 下一个8米的空气层，要比上一层更密实些，所以压强的增加数在绝对数值上要比上一层更大。因为这里所增加的1/1000，已经是比较大的数值的1/1000了。

在地面下 3×8 米深处的压强 = 正常气压的 $(1.001)^3$ 倍

在地面下 4×8 米深处的压强 = 正常气压的 $(1.001)^4$ 倍

总而言之，在 $n\times8$ 米深处，大气的压强就等于正常压强的 $(1.001)^n$ 倍，并且在压强不十分大的时候，空气的密度也要增加同样的倍数(马略特定律)。

根据小说里的话，地下旅行家所到的深度不过是48公里，所以重力的减小以及同这种减小有关的空气重力的减小，都可以不必计算。

现在就可以计算一下儒勒·凡尔纳的地下旅行家在48公里(48 000米)深处所受到的压强。在我们的式子里

$$n=\frac{48\ 000}{8}=6000$$

这里需要计算的是 $(1.001)^{6\ 000}$。把1.001自乘6 000次是一个非常枯燥而且费时的工作，所以我们得利用对数。关于对数，拉普拉斯说得很正确，[1] 它能缩短我们的劳动，因而增加计算的人的寿命。用对数算的时候，我们有这样一个式子：要求的数的对数等于

$$6\ 000\times\lg1.001=6\ 000\times0.00043=2.6$$

从对数2.6，我们得到了要求的数等于400。

所以在48公里的深处，大气的压强是正常气压的400倍。实验告诉我们，在这种压强下空气的密度会增加到原来的315倍。所以我们的地下旅行家说，除了“耳朵痛”以外没有感到任何不舒服，那是很可怀疑的……在儒勒·凡尔纳的小说里，又曾

---

[1] 在学校里对于对数表讨厌的人，如果读了拉普拉斯关于对数的说明，也许会改变自己对它的不友好的态度的。下面是《宇宙体系论》里的一段话：对数的发明，“可以把几个月所做的计算减少到在几天完成，我们可以说这方法使天文学工作者的寿命延长一倍，而且使他们少犯错误，以及因长时间计算而造成的不可避免的烦闷。这种完全由学识而来的发明是人类精神上的宝贵成就；在工艺上人们依赖自然界里的质料和能量才能作出发明，而计算技术却只靠人们自己的创作”。



经说到人们到过地下更深的地方——120公里，甚至325公里。在那些地方空气的压力应该高到可怕的程度；可是人所能受得住的空气压力，是不能超过3～4个大气压的。

利用同一个式子，我们可以计算在多深的地方，空气的密度会变得像水一样，也就是说密度达到原来的770倍。得到的数字是53公里。但是这个结果是不可靠的，因为在高压下，气体的密度已经不和压强成正比。马略特定律只是在不太高的压强下(100大气压以内)才是完全正确的。下面是纳杰列尔实验得到的关于空气密度的资料：

压力	密度
200大气压	190
400大气压	315
600大气压	387
1 500大气压	513
1 800大气压	540
2 100大气压	564

从这张表里可以看出，密度的增加是落在压强增加的后面的。所以儒勒·凡尔纳小说里的科学家想在达到某种深度以后，空气的密度会比水的还高，那是白费心思的。是不会有这种情况的，因为空气只有在3 000个大气压下，才能同水一样密。在这以后，已经几乎不能再压缩了。要把空气变成固体，单改变压强而不同时剧烈降低温度(零下146摄氏度)是不可能的。

可是为了公道起见，也需要指出，儒勒·凡尔纳的小说是在刚才举出的那些事实发现以前就出版很久了的。所以这位作者虽然说得不对，也是可以原谅的。

让我们再用上面那个式子来计算一下，不会危害在井底工作的人的健康的矿井，最深的应该是多深。我们的身体受得住的最大的空气压强是3个大气压。把需要求得的矿井的深度用x来

代表，我们可以得到这个方程式：

$$(1.001)^{\frac{x}{8}}=3$$

可以用对数算出 x 的数值。得出的结果是 8.9 公里。

所以，在地面以下大约 9 公里的深处，人是能不受危害地居住的。

在深矿井里

撇开小说家的幻想来谈事实，谁曾到过离地心最近的地方呢?当然是矿工。我们从前面第四部分已经知道，世界上最深的矿井在南非洲，它的深度已经在 3 公里以上。在这里所讲的并不是钻探工具到达的深度(钻探工具在某些地方已经达到了 7.5 公里以上的深度)，而是人迹所到的地方。下面是法国作家留克·裴尔登博士亲自参观了巴西的一个矿场以后关于这个矿场的描写(这个矿场的深度大约是 2 300 米)：

> *有名的摩洛·维尔荷金矿，坐落在离里约热内卢 400 公里的地方。在多山的区域里坐了 16 小时火车以后，你就可以下降到一个四周围着丛林的深谷里。在这以前从来没有人到过的深处，有一家英国公司在开采金矿。*
>
> *矿脉是斜着往深里走的。矿井也随着矿脉建成了六级采掘段。竖直的有竖井，水平的有巷道。为了寻找黄金，人类才去做这个钻向地心的最勇敢的尝试——在地壳里挖掘最深的矿井，这的确是现代社会的一个最突出的特征。*



你得穿上帆布的工作服和皮革的短上衣。在里面你得特别小心：落到井里的一块极小的石头都会把你打伤。我们由矿里的一位工长陪着一起下井，进入了第一个巷道，那里灯光很亮。巷道里的低到4摄氏度的冷风使你浑身发抖——这是为了降低矿井深处的温度而通进去的冷空气。

乘着狭窄的金属笼子走完了第一个深700米的竖井以后，就到了第二个巷道里。在第二个竖井里继续下降，空气变得比较暖和了。你已经到达比海平面低的地方了。

从下一个竖井开始，空气就热得烫脸了。你挥着汗，在低的穹隆下曲着身体，朝着钻机的响声方向前进。有许多裸体的人在飞扬的尘土里工作。他们流着汗，手里不停地传递着水瓶。你不要触动那些刚打下来的矿石，它们的温度高达57摄氏度。

什么是这种可怕而且可恶的活动的结果呢——不过是每天大约10千克的黄金……

在描写矿井底部的自然条件和工人们受到的极端剥削的程度的时候，这位法国作家只指出了温度高，而没有提到空气压力的增大。

让我们计算一下，在2 300米的深处，空气的压力到底有多大。假如那里的温度和地面上一样，那末按照我们已经知道的公式，那里的空气密度就会增长到原来的

$$(1.001)^{\frac{2300}{8}}=1.33\text{倍}$$

实际上那里的温度并不和地面一样，而是比地面高。因此空气的密度就不会增长到这么大，而是要小些。最后的结果是，就密度来说矿井底的空气和地面的空气之间的差异，只比炎热的夏

天的空气和严寒的冬天的空气之间的差异大一些。现在就能明白，为什么矿里的气压不会引起参观的人注意。

可是显著的空气湿度在这种深井里却有很大的影响，在高温下，它会使里面的人忍受不住。南非洲有一个深2 553米的矿井(约翰内斯堡矿)，在温度是50摄氏度的时候，湿度竟达到100%。这里现正在建造一种所谓“人造气候”的装置，这种装置所起的冷却作用，同2 000吨冰相当。

乘平流层气球上升

在前几节里，我们曾经去地心作过想象的旅行，那时候，那个表示气压和深度关系的公式帮了我们不少的忙。现在让我们冒险上升到上面去，利用同一个公式看看在极高的地方空气压力是怎样变动的。这个公式现在的形式是：

$$p = 0.999^{\frac{h}{8}}$$

在这个式子里，p是大气压强，h是高度(单位是米)。在这里我们用小数0.999代替1.001，这是因为每上升8米，气压不是增高0.001，而是降低0.001。

首先让我们解答这个问题：得升到多高，气压才会减低到原来的一半?

要解答这个问题，我们用$p=0.5$代入上面这个公式，然后求高度h。这样我们得到，

$$0.5 = 0.999^{\frac{h}{8}}$$

对于会用对数的读者说来，这个方程是不难解的。答案是：$h=5.6$公里。就是说，要气压减低一半，必须上升到离地面5.6公里的地方。

现在让我们跟在航空家后面，上升到更高的地方，到19公



里和 22 公里处去。大气里这么高的地方已经是在所谓平流层里。因此我们乘着来到这里的气球已经不是普通的气球，而是平流层气球。有两只气球曾经在 1933 年和 1934 年创造了上升高度的世界纪录：前一个是 19 公里，后一个是 22 公里。

让我们算一下这么高的地方的气压吧。

我们计算出，在 19 公里高处的气压应当是

$$0.999^{\frac{19000}{8}}=0.095\text{ 大气压}=72\text{ 毫米}$$

在 22 公里高处应当是

$$0.999^{\frac{22\,000}{8}}=0.066\text{ 大气压}=50\text{ 毫米}$$

可是在平流层气球驾驶员的纪录里，我们却查出在上面说的高度上，气压并不同我们算出的一样，而是在 19 公里处是 50 毫米，在 22 公里处是 45 毫米。

为什么得出的结果会同实际不符合呢？我们的错误在哪里呢？

马略特的气体定律，在压力这样小的情况下是完全可以适用的，然而这一次我们却忽略了另外一件事情：把整个 20 公里厚的空气层的温度不能看成是全都相同的。在实际上，它是随着高度的上升而显著地降低的。平均说来，每上升 1 公里，温度要下降 6.5 摄氏度。这样到 11 公里的高处，温度已经是零下 56 摄氏度了。可是再上去，温度在很大一段距离里却不再降低了。如果把这些情况都计算进去(这已经不能用初等数学来计算了)，就可以得出更符合实际的结果。由于同样原因，我们以前求出的地下深处的气压，也应当看做是近似的答案。



17 热的现象

扇　子

人在扇扇子的时候，自己当然会感到凉快。他这样做，似乎对屋子里的其余的人是没有一点害处的，而且，当时跟他在一起的人好像还应当感谢他，因为他扇凉了屋子里的空气。

现在让我们看实际情况是不是这样。为什么我们用扇子扇的时候会感到凉快呢?原来，直接贴在我们脸上的那一层空气变热以后，就成了一层看不见的罩在我们脸上的热空气面罩，它使脸部“发热”，因为它延缓了我们脸上的热进一步消散。如果围绕着我们的空气不流动，那末贴在我们脸上的这层热空气只能十分缓慢地、被比较重的没有变热的空气挤向上面去。当我们用扇子扇走热空气层的时候，我们的脸部就老是跟一份没有变热的新空气接触着，不断地把自己的热传给它们。我们身体上的热总是在消散，所以我们觉得凉快。

可见，人扇着扇子的时候，他是不断地在从自己的脸部赶走热空气，用没有变热的空气来代替它。等到不热的空气又变热了的时候，另外一份不热的空气又来代替它了……

扇子能加速空气的流动，使整个屋子里的空气温度很快地变得到处一样。可见扇着扇子的人是在用着别人周围的凉空气，使自己感到舒服。在下面我们还要谈一下扇子在另一种情况下所起的作用。



有风的时候为什么更冷

大家都知道，人在没有风的天气里比在有风的天气里更耐冷。可是这种现象的原因并不见得每个人都知道得很清楚。在有风的时候觉得更冷，那只有生物才能感到。如果把温度计放在风里，它的水银柱是一点也不会下降的。人在有风的冷天所以会感到特别冷，首先是由于在那时候从脸部(一般说就是从全身)散掉的热要比在没有风的时候多得多：因为在没有风的时候，被身体暖和了的空气并不是很快地被新的一份冷空气所代替的。风力越强，在每一分钟里，同皮肤接触的空气流动得也越多。因此，每一分钟从我们身体上散掉的热量也越多。单是这一点，已经足够引起冷的感觉了。

但是还有另外一种原因。我们的皮肤经常在蒸发水分，就是在冷空气里也是这样。可是蒸发需要热量，就从我们身体上和从贴在我们身体上的那层空气里把热量夺取出去。如果空气不动，蒸发就进行得很慢，因为贴在皮肤上的空气层很快就饱和了水蒸气（在饱和了水蒸气的空气里，蒸发是不能进行的)。可是如果空气是动的，贴在皮肤上的空气经常在更换，那末蒸发就常常进行得很顺利，这样，就会大量地消耗我们身体里的热。

那末风的冷却作用有多大呢?这要看风的速度和空气的温度而定，一般说来，它比所想象的要大得多。现在让我举例来说明这一点。假定空气的温度是 4 摄氏度，但是风一点也没有。在这样的条件下，我们皮肤的温度是 31 摄氏度。如果现在吹来了一阵刚能吹动旗子但还不能吹动树叶的微风(速度是 2 米每秒)，那末我们皮肤上的温度就要下降 7 摄氏度。在能使旗子飘扬的风

(速度是6米每秒)里，皮肤的温度要下降22摄氏度，结果就只剩9摄氏度了。

总之，要判断我们所感到的冷，单凭温度是不够的，对于风的速度同样也应当注意。列宁格勒和莫斯科的寒冷程度是相同的，但是一般说莫斯科人会比列宁格勒人觉得冷得好受些，因为在波罗的海沿岸平均风速是5～6米每秒，而在莫斯科每秒只有4.5米。在外贝加尔区平均风速只有1.3米每秒，所以那里的寒冷会更好受些。东部西伯利亚的寒冷是出名的，但是它并不像住在欧洲吹惯了比较大的风的人所想象的那样难受。原来东部西伯利亚差不多是完全没有风的，特别是在冬季。

沙漠的热风

"这样说来，风在炎热的日子里也应当带来凉快了，"读者读了上面一段文章以后也许会说。"那末为什么在这种情况下，旅行家有时候又提到所谓沙漠的热风呢？"

所以会有这个矛盾，是因为在热带气候里，空气常常比人体更热。在那里，人在起风的时候会觉得更热，而不是觉得更凉快是一点也不奇怪的。那里已经不是人体把热传给空气，而是空气把热传给人。因此每分钟里流过来同人体接触的空气越多，人就越感到热。不错，这里的蒸发作用还是会因起风而加强的，但是热风带给人体的热会更多些。这也就是为什么沙漠里的居民，例如土尔克明人，要穿长袍和戴皮帽。



面纱能不能保温

这是日常生活里的又一个物理学问题。妇女们都肯定地说，面纱可以保温，不戴它脸就觉得冷。可是在看到面纱是那样薄，上面还有相当大的孔的时候，男人们往往是不相信这话的，总以为面纱的保温作用只是妇女们的心理作用。

可是，如果你回想一下前面所说的话，那你对于这个说法就不会认为太没有根据了。面纱上的孔尽管很大，空气要透过面纱总要慢一些。直接贴在脸上的那一层空气变热了以后，本来就有面罩的作用，而现在这一层空气在面纱阻拦下，不会像没有面纱的时候那样很快地被风吹散。因此没有理由不相信妇女们说的话：在略微有点冷和起着微风的时候散步，不戴面纱要比戴着面纱的脸上觉得凉些。

冷 水 瓶

你如果没有看到过这种瓶，你也许听人说起过或者在书报里读到过。这种用没有烧过的粘土做的容器有一种有趣的性能，它能使灌在里面的水比周围的物体变得更凉些。这种容器，南方各民族用得很多。它有各种各样的名字，在西班牙叫“阿里卡拉查”，在埃及叫“戈乌拉”，等等。

这种水瓶的冷却作用的原因很简单：瓶里的水透过粘土壁来到瓶外会慢慢地蒸发，蒸发的时候就从容器和它里面的水里夺取一部分热。



不过这种容器里的水也不会变得很凉，像某些南国游记里所描写的那样。这里的冷却作用是不会很大的。它同许多条件有关系。空气越热，渗到容器外的液体就蒸发得又快又多，容器里面的水因而也就越凉。它也同周围空气的湿度有关：如果空气里水分很多，蒸发就进行得慢，容器里的水也就不十分容易冷却；反过来，在干燥的空气里，蒸发进行得很快，容器的冷却作用也就更显著些。风同样能够加速蒸发、帮助冷却。你如果在热而有风的日子里穿一件湿衣服，你就会觉得很凉快，从这一点就可以明白风的作用了。冷水瓶里温度的下降不会超过 5 摄氏度。在南方炎热的日子里，温度计有时候指着 33 摄氏度，这时候冷水瓶里的水往往同温水浴池里的水的温度相同：28 摄氏度。这样看来，这种容器的冷却作用实际上并没有多大用处。但是它能很好地保持冷水的温度，使它不热，它的主要用途也就在这一方面。

我们可以计算一下冷水瓶里的水可以冷到什么程度。

假设我们的冷水瓶可以盛水 5 升，并且假定瓶里的水有 1/ 10 升已经蒸发掉了。在 33 摄氏度的热天，蒸发 1 升水大约需要 2 414 千焦(580 大卡)[1] 的热。既然瓶里的水已经蒸发掉了 1/ 10，可知它已经消耗了 240 千焦(58 大卡)的热。假如这 240 千焦(58 大卡)的热全是瓶里的水供给的，瓶水的温度就会降低到$\frac{58}{5}\approx 12$ 摄氏度。可是蒸发用的热大部分是从瓶壁上和瓶壁四周的空气里取得的；另一方面，瓶里的水一边在冷却，一边又在从贴在瓶外的热空气里取得热量而变热。因此，瓶里的水只能冷到上面求得的数字的一半。

很难说冷水瓶在什么地方会冷却得更多些——是在日光下，还是在背阴处。在日光下，蒸发是加快了，可是同时进入瓶里的热也加多了。最好的方法大概是把冷水瓶放在略微有些风的背阴处。

---

〔1〕1 大卡 等于 4.18 千焦。全书同。

不用冰的“冰箱”

根据蒸发致冷的原理，可以制造一种不用冰的冰箱来保藏食物。这种冰箱的构造很简单。它是用木头做的(最好用白铁皮来做)，箱里装有架子，架上可以安放要冷藏的食品。在箱顶上放一个长形的容器，容器里盛清洁的冷水，再拿一块粗布，把它的一端浸在容器里，让布的其余部分顺着“冰箱”的后壁往下挂，使另一端落在“冰箱”下面的另一个容器里。粗布湿透了以后，水就会像通过灯芯一样，不断地在粗布上通过。这时候水会慢慢蒸发，使“冰箱”的所有部分变冷。

这种“冰箱”应该放在室中凉爽的地方，并且要每天晚上更换冷水，使它在夜里来得及完全变凉。当然，盛水的容器和吸水的粗布应当十分清洁。

我们受得住多高的热

人类耐热的能力，比一般所想象的要强得多。南方各国人民能忍受住的温度，比我们住在温带的人认为无法再忍受的温度要高得多。澳洲中部夏天的温度在背阴的地方常常高到46摄氏度，最高甚至到过55摄氏度。轮船从红海驶入波斯湾的时候，船舱里虽然不断地通着风，里面的温度仍然高到50摄氏度以上。

地面上，在自然界里见到的最高温度，没有超过57摄氏度的。北美洲加利福尼亚一个名叫“死谷”的地方，曾经测定有过

这样高的温度。

刚才所说的温度都是在背阴处测量出来的。让我顺便解释一下，气象学家为什么喜欢在背阴处而不喜欢在阳光里测量温度。原来只有放在背阴处的温度计测出来的才是空气的温度。如果把温度计放在阳光下，太阳就会把它晒得比周围空气热得多，因而温度计上所指的度数就不再是周围空气的温度了。所以如果用放在阳光里的温度计来测温度，那是一点意义也没有的。

已经有人用实验方法测出了人体能够忍受的最高温度。原来在干燥的空气里，把人体周围的温度极慢极慢地增高，人不但能忍受住沸水的温度(100摄氏度)，有时候还能忍受住更高的温度(一直高到160摄氏度)。英国物理学家布拉格顿和钦特里为了实验，曾经在面包房的烧热的炉子里停留过几小时就是证据。丁达尔也曾经指出过："人如果停留在空气的温度热到可以烧熟鸡蛋和牛排的房间里，还是可以安全无害的。"

那么，人为什么会有这样高的耐热能力呢?原来人体实际上是不接受这样的温度的，它还保持着接近正常体温的温度。它用大量出汗的方法来抵抗高温。汗水蒸发的时候，能从紧贴皮肤那一层空气里吸取大量的热，使这层空气的温度大大减低。不过要人体能够忍受高温，惟一需要的条件是：人体不能直接接触热源，而且空气必须干燥。

许多人有过这样的经验，盛夏温度达到30摄氏度以上，比之黄梅天温度只有20多摄氏度反而更容易忍受。原因当然在于黄梅天湿度高，而盛夏的湿度比较低。

是温度计还是气压计

有一个出名的故事，谈到一个人因为下面所说的一种不平



常的原因而不愿洗澡。

“我把气压计插在浴盆里，可是气压计告诉我有雷雨……这时候洗澡是危险的!”

可是你别以为温度计和气压计常常是很容易分清的。有一些这样的温度计，说得正确一些是验温器，很可以叫它做气压计；相反的，也有一些气压计可以叫做温度计。希腊人希罗想出的那种验温器(图 230)就可以作为例子。在阳光里把球晒热以后，球上部的空气就会膨胀，膨胀的空气就顺着曲管把水压到球外去。水开始从管的一端滴在漏斗里，再从漏斗流到下面的箱子里。在冷天就相反，球里的空气压力会减小，于是下面箱子里的水就在外面空气的压力下沿着直管升到球里。

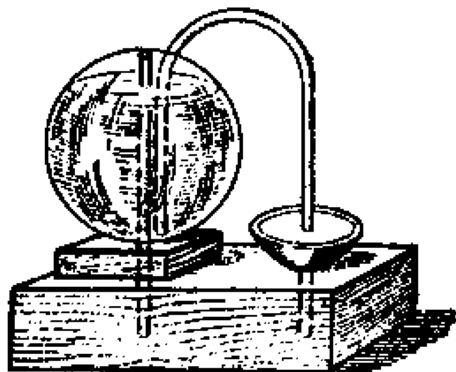


图 230　希罗的验温器

可是这个仪器对气压的变动也是很敏感的：当外面的气压降低的时候，球里还保持着原先那种比较高的压力的空气就会膨胀，并且把一部分水顺着管子压进漏斗里。在外面的气压升高的时候，箱子里的一部分水也会被外面比较高的气压压到球里来。温度计每升降一摄氏度使球里的空气体积发生的变化，同气压计上水银柱升降 $\frac{760}{273}$，也就是大约 2.5 毫米的时候，球里空气体积所发生的变化一样。在莫斯科，气压的变动可以达到 20 毫米以上，20 毫米相当于希罗验温器上的 8 摄氏度，也就是说，气压降低 20 毫米很容易误认为温度升高了 8 摄氏度。

这样你就可以看出，古老的验温器简直可以说是一种气压计。有一个时候，市场上曾经可以买到一种盛水的气压计，它差不多也是一种温度计。可是关于这一点，不但购买的人不可能想到，也许连发明它的人也想不到。



煤油灯上的玻璃罩是做什么用的

很少有人知道，煤油灯上的玻璃罩在变成目前的形状以前，曾经经历了多么长的道路。

灯罩究竟有什么用呢?

对于这样一个极其平常的问题，也未必是每一个人都能正确地回答的。保护火焰使它不致被风吹灭，只是灯罩的次要功用。它的主要功用是增加火焰的亮度，加快燃烧的过程。灯罩的功用同炉子或工厂里的烟囱的功用一样，它能使外面的空气大量地流向火焰，增强通风。

让我们把这一点仔细研究一下。火焰烧热灯罩里面的那个空气柱比它烧热灯的四周的空气要快得多。烧热了的空气变得很轻，就被从下面经过灯孔来的、还没有热的、比较重的空气推向上面。这样一来，空气就不断地从下向上流动；这种流动会不断地带走燃烧生成的产物，并且带来新鲜空气。灯罩越高，热空气柱和冷空气柱在重力上的差数就越大，于是新鲜空气也就更有力地流入灯罩，使燃烧进行得更快。这里所发生的一切同工厂的高烟囱里所发生的完全是一回事。所以这些烟囱也要做得很高。

有趣的是，达·芬奇(1452 ~ 1519)对于这种现象作过研究，他的笔记里有这样一句话:“有火的地方，在它的周围就会形成气流，这种气流能够帮助燃烧，加强燃烧。”



为什么火焰自己不会熄灭

如果你好好地想一想燃烧过程，你自然而然会产生一个问题：为什么火焰自己不会熄灭？我们知道，燃烧生成的产物二氧化碳和水蒸气都是不能燃烧的物质。所以火焰从一开始燃烧起，就会被不能助燃的物质包围住，这阻碍了它同空气接近。没有空气，燃烧就不能持久，也就是火焰会熄灭。

那么为什么这种事情不发生呢？为什么在燃料没有烧完的时候，燃烧过程会不间断地持续下去呢？

惟一的原因就是气体热了以后会膨胀，因而会变得更轻。只是因为这一点，热的、燃烧生成的产物就不能留在它形成的地方，或在直接靠近火焰的地方，而要很快地被新鲜的空气推到上面去。假如阿基米德原理在气体上不适用(或者说，假如没有重力)，那末无论什么样的火焰都不能燃烧很久，而会自己熄灭的。

火焰燃烧生成的产物，对于火焰的有害的影响是极容易看出来的。你自己就常常在不知不觉中利用它来熄灭灯里的火焰。想一想你是用什么方法来吹灭煤油灯的吧。你是在灯罩上面吹它的，那就是说，你在把燃烧生成的不能助燃的产物赶向下面，赶到火焰上去。这样，火焰就因为得不到充足的空气而熄灭了。

儒勒·凡尔纳小说里漏写的一段

儒勒·凡尔纳曾经详细地告诉了我们，那三位勇敢的人在奔赴月球的炮弹车厢里是怎样度过时间的。可是他没有谈到米歇尔·



阿尔唐在这种非常的环境里是怎样完成他的炊事员的任务的。也许这位小说家认为在飞行炮弹里做烹调工作，没有什么东西值得描写。如果真是这样，那他就错了。原因是在飞行炮弹里面一切物体都变得没有重力了。[1] 儒勒·凡尔纳忽略了这一点。如果你同意在没有重力的厨房里做烹调工作这一情节是一个完全值得小说家来描写的题目，那你一定会惋惜这位《炮弹奔月记》的天才作家竟没有注意到这个题目。现在就让我试着把那篇小说里漏写的一段补充进去，并尽可能使读者读了以后能得到像儒勒·凡尔纳本人写的一样的效果。

在读这一段文章的时候，读者们应该随时记住，在炮弹里面——前面已经说过——是没有重力的，里面所有的物件都是没有重力的。

在没有重力的厨房里做早餐

“朋友们，大家都还没有吃早点吧，”米歇尔·阿尔唐向星际旅行途中的同伴们说，“虽然我们在炮弹车厢里失掉了重力，但是总不见得连食欲都失掉了吧。朋友们，我准备给你们做一顿没有重力的早餐。这份早餐里的菜一定是世界上所有的菜当中最轻的几道。”

不等同伴们回答，这个法国人就动手工作起来。

“我们的水瓶怎么竟好像是空了，”阿尔唐一面摆弄那个拔去了塞子的大水瓶，一面自言自语地抱怨着，“你骗不了我的，我知道你为什么这样轻……塞子已经

---

[1] 这一种有趣情况，我已经在前面详细解释过了，此外在我写的《行星际的旅行》等书里也都讲到过。



拔掉了，快把里面没有重力的东西流到锅里去吧！”

可是无论他怎样把瓶子放倒，水总是不流出来。

“别费事了，亲爱的阿尔唐，”尼柯尔出来帮助他说，“你应当懂得，在我们这个没有重力的炮弹车厢里，水是流不出来的。你得把它从瓶里抖出来，像抖浓的糖浆一样。”

阿尔唐略微想了一下，就用手掌在那个瓶口朝下的玻璃瓶底上拍了一下。却又奇怪，瓶口上立刻胀出了一个像拳头一样大的水球。

“我们的水变成什么啦？”阿尔唐惊奇地说，“这简直是太出乎意料了！有学问的朋友们，请给我解释一下，这到底是怎么一回事？”

“亲爱的阿尔唐，这就是水滴，简单的水滴。在没有重力的世界里，多大的水滴都会有的……你要记住，流体只有在重力的影响下，才会同容器的形状一样，才会成股地往外流。因为这里没有重力，所以流体就只受它自己的分子力支配，形成球的形状，像普拉图的有名实验里的油一样。”

“我不懂什么普拉图和他的实验！我的职务是烧开水做汤。我敢发誓，什么分子力也不能阻止我！”这位法国人急躁地说。

他开始用力把水倒在那在空中飞着的锅上面——可是好像所有的一切都商量好在反对他。一些很大的水球来到锅上以后，就很快沿着锅面滚了开来。事情并没有完：水又从锅的里壁越到外壁，顺着锅壁散开——于是很快这口锅就好像罩上了厚厚的一层水。在这种情况下要把水烧开自然是不可能的。

“这是一个非常有趣的实验，它证明了内聚力是多么强大。”沉着的尼柯尔镇静地对怒气冲冲的阿尔唐

说，“你不要激动，要知道这只是液体润湿固体的普通现象，不过，在这里没有重力来阻止这种现象全力发展罢了。”

“没有重力来阻止它，那真是该死！”阿尔唐反驳说，“不管它是不是液体润湿固体的现象，我的水总得在锅里煮，而不能在锅外煮。这真是新鲜事儿！在这样的条件下，无论哪一个厨师都无法做出汤来的！”

“如果这种润湿现象妨碍你，你也可以用一个简单方法防止它，”巴尔比根站起来安慰他说，“在物体上面涂了即使薄薄的一层油，水就不能润湿它，这一点你还记得吧。你只要在锅的外面涂上一层油，就可以把水留在锅里了。”

“好极了！这才是真正的学问，”阿尔唐一面照着做，一面高兴地说。然后他就开始在煤气炉上烧水。

不料阿尔唐又遭到了反对。煤气炉也跟他开起玩笑来了：暗淡的火焰燃烧了半分钟以后，不知什么道理就熄灭了。

阿尔唐在煤气炉旁边忙碌着，耐心地照看着火焰，可是白忙了一阵，火焰还是燃不久。

“巴尔比根！尼柯尔！难道就没有办法叫这固执的火焰按照你们的物理学原理和煤气公司的章程燃烧起来吗？”这位垂头丧气的法国人向朋友们求救了。

“可是这里也没有什么异常的意外事情，”尼柯尔解释道，“这火焰正是按照物理学的原理燃烧的。至于煤气公司……我想，假如没有重力的话，它们早已破产了。你知道在燃烧的时候，会产生一些不能燃烧的气体：二氧化碳和水蒸气。通常这些燃烧生成的产物是不会逗留在紧靠火焰的地方的；因为它们是热的，因而也是比较轻的，所以会被四面流来的新鲜空气排到上面



去。可是这里没有重力，因此燃烧生成的产物就逗留在它们产生的地方，在火焰周围形成一层不能燃烧的气体，阻止新鲜空气同火焰接近。就是这个缘故，火焰在这里会燃烧得这样暗淡，会熄得那样快。要知道灭火器的作用也是这样，用不能燃烧的气体来包围火焰。"

"照你这样说，"阿尔唐插嘴说，"如果地球上没有了重力，那就不必要救火队了。失了火会自己熄灭，是不是?"

"说得对，的确是这样。不过现在我们来帮助你，请你把火再点起来，然后向火焰里吹气。我相信，我们是能够用人工吹风法来使火焰像在地球上一样燃烧起来的。"

于是，他们照这样做了。阿尔唐点着了火以后就动手做饭，同时好像有些幸灾乐祸地看着尼柯尔和巴尔比根两人轮流地吹火和扇火，让新鲜空气不断地流到火焰里去。在这位法国人的内心里，认为"这许多麻烦"全是他的朋友和他们的科学召来的。

"你们这样吹风有些像在工厂里的烟囱所做的工作，"阿尔唐带点讥诮的口吻说，"我非常可怜你们，我的科学家朋友，可是如果我们想吃一顿热的早餐，那就一定得服从你们的物理学的命令。"

可是时间一刻钟、半小时、一小时过去了，锅里的水竟没有开的意思。

"你得有些耐心，亲爱的阿尔唐。普通有重力的水开得很快，你懂得是什么缘故吗?那只是因为锅里的水在发生对流作用：底下的一层水热了就变轻，被冷水排向上面，结果全部的水就很快得到了高温度。你有没有做过从上面而不是从下面来烧水的事呢?这时候各层水就不会起对流作用，因为上层烧热了的水只能留在原

处。水的传热作用是很小的，上层的水甚至已经达到沸点，下层水里可能还有没有融化的冰块。可是在我们这个没有重力的世界里，无论在哪一面烧水都一样：锅里不会发生水的对流，所以水应该热得非常慢。如果希望水热得快，你就应该不时搅拌水。”

尼柯尔又告诉阿尔唐，不要把水烧到100摄氏度，而要烧到稍微低一些的温度。在100摄氏度的时候会产生许多水蒸气，而水蒸气在这里同水的密度相同(都等于零)，会混合在一起，形成均匀的泡沫。

接着豌豆又意外地捣起蛋来。当阿尔唐解开麻袋轻轻地用手扒了一下的时候，豌豆就向四周散开，开始在车厢里无休止地飘来飘去，碰到墙壁又弹了回来。这些飘着的豌豆差一点闯了一个大祸：尼柯尔在无意中吸进了一颗豆子，使他不断地咳嗽，几乎噎死。为了避免发生这种危险和澄清空气，我们的朋友们都热心地用网捕捉飞豆，这网是阿尔唐预先带在身边，准备到月球上去“采集月球上的蝴蝶标本”的。

在这样的条件下，做饭真不容易。阿尔唐肯定说，就是最有本领的厨师到这里来，也是不会有办法的，这句话真不假。在煎牛排的时候，也忙乱了一大阵：得始终用叉子把牛肉叉住，不然的话，在牛排下面出现的油蒸气的压力会把牛排推出锅去，使没有熟的肉往“上面”——姑且使用这两个字，因为在这里是没有“上面”和“下面”的——飞。

在这个没有重力的世界里，就是连吃饭这件事本身也是一种奇怪的景象。朋友们用各种不同的姿势悬在空中，怪好看的，可是时时刻刻发生着彼此撞头的事情。坐下来当然是不可能的。像椅子、沙发、板凳之类的东西，在没有重力的世界里是完全没有用处的。其实桌子



在这里也完全可以不用，要不是阿尔唐坚持一定要在“桌旁”吃饭的话。

要烧熟肉汤已经很不容易，可是要喝肉汤比这还要困难。一开始要把没有重力的肉汤分别倒在几个盘子里，怎样也不能成功。阿尔唐为了这件事几乎空忙了一个早晨，他忘记了肉汤是没有重力的，怀着烦恼的心情把锅底朝天翻过来，以便把固执的肉汤赶出锅外。结果，锅里却飞出了一个很大的球形水滴——丸子样的肉汤。这真需要阿尔唐显出魔术家的手段，才能十分困难地把这熟肉汤丸子再捉回来，放进锅里。

试用羹匙来舀汤，也没有得到结果：肉汤把整个羹匙一直到手指全都打湿了，并且密实地盖在上面。于是把油涂在羹匙上，以便防止这种润湿现象。可是情况并没有好转：肉汤在羹匙里变成了小球，并且无论怎样也不能把这没有重力的丸子顺利地送进嘴里。

最后还是尼柯尔想出一个办法，解决了这个问题：他用蜡纸做了些纸管，大家用蜡纸管吸肉汤，才算把它喝到了。我们的朋友们后来在旅途中，总是使用这种方法来喝水、喝酒和喝不论什么样的液体的。[1]

---

〔1〕在这本书出版以前许多读者曾经写信问我，他们对于在没有重力的环境里能够喝水这一点，表示怀疑。他们甚至认为就是用我刚才所说的方法也不能喝到水。他们认为在飞行炮弹里空气是没有重力的，因而也不会产生压力。在没有压力的情况下，要用吸的方法来喝水是不可能的。奇怪的是，这种意见还被一些评论家刊载在报章上。但是十分明显的，没有重力的空气在这种条件下并不一定就没有压力。空气在密闭的空间里有压力，完全不是因为它有重力，而是因为它是气态物质，它想无限制地膨胀。在地球表面的无边际的空间里，重力担任着阻止气体膨胀的墙壁的角色。这种看惯了的重力和压力的相互关系把批评我的人引入了迷途。

为什么水会浇灭火

这个问题虽然很简单，但是常常有人把它答错，所以我们要在这里简短地讲一下，水对火究竟起了些什么作用，希望读者不要怪我多此一举。

第一，水一触到炙热的物体，就会变成蒸汽，这时候它从炙热的物体上夺取了大量的热。从沸水转变成蒸汽所需要的热，相当于同量的冷水加热到100摄氏度所需要的热的5倍多。

第二，这时候形成的蒸汽所占的体积，要比产生它的水的体积大好几百倍；这么多的蒸汽包围在燃烧的物体外面，就使得物体不可能和空气接触，而没有了空气，燃烧也就不能进行了。

为了加强水的灭火力量，有时候还向水里加些火药！这看来似乎太奇怪了，可是这是完全有道理的：火药很快地烧完，同时产生大量不能燃烧的气体，这些气体会把燃烧着的物体包围起来，使燃烧发生困难。

怎样用火来熄灭火

你也许听到过，最好的、有时也是惟一的跟森林或草原上的火灾作斗争的方法，是迎着大火的来向放火。新的火焰朝着猖獗的火海前进，消灭掉容易燃烧的物质，使大火失去燃料。两堵火墙遇在一起，就会立刻熄灭，好像彼此吞食掉了一样。

美洲草原里发生大火的时候，人们就曾经使用过这种方法来扑灭大火。关于这件事的叙述，许多人一定在库帕所写的长篇小

说《草原》里读到过。一位老猎人把一些被困在草原大火里的快要被烧死的旅客拯救出来，这一段动人的情节，难道我们会忘掉吗?下面就是从小说《草原》里摘录下来的几段：

老人突然采取了断然的措施。

"是行动的时刻了。"他说。

"你想行动已经太迟了，可怜的老头子!"米德里顿叫道,"大火离我们只有1/4公里了，风又是用这样可怕的速度向我们这里吹!"

"是吗?火，我也不怎么怕它。好，孩子们，别尽站着!现在马上动手割掉这一片干草,清出一块地面来。"

在很短的时间里就清出了一块直径大约6米的地面。老猎人吩咐妇女们，说她们可以用被褥把自己那些容易着火的衣服盖起来，然后就领她们走到这块不大的空地的一边去。做了这些预防措施以后，老人就走到这块空地的另一边，那里大火已经像个高而危险的环墙，把旅客们包围了。他拿了一束非常干的草放在枪架上点起来。容易燃烧的干草立刻烧着了。老人把烧着的干草扔到高树丛里，然后走到圈子中央，耐心地等待着自己行动的结果。

他放的这一把火贪婪地扑向新的燃料，一会儿功夫草也烧着了。

"现在你们可以看火怎样跟火作战了。"老人说。

"这不是更危险了吗?"吃惊的米德里顿大声叫道，"你不但没有把敌人赶走，反而把它引到身边来了。"

老人放的这把火越烧越大，同时向三方面蔓延开来。但是在第四方面却因为缺少燃料，熄灭了。随着火势的越来越大，在火前面出现的空地也越来越大了。这片刚出现的黑色冒烟的空地，要比用镰刀割的草地光得



图 231　用火来扑灭草原里的火灾

多。他们刚才清除出来的这块地方就随着从其他几面包围着它的火焰而扩大开去，要不是这样的话，那避难者的处境是会变得很危险的。几分钟以后，各方面的火焰都后退了，只有烟还包围着人们，但是这对于人已经没有危险了。大火已经疯狂地向前面奔去了。

旁边的人同斐迪南王的廷臣们看哥伦布竖鸡蛋一样，是怀着惊异的心情看这个老猎人的简易灭火法的。

但是，这种跟草原和森林大火作斗争的方法，并不像初看的时候那样简单。只有极有经验的人才能利用迎火燃烧的方法来扑灭火，否则只会引起更大的灾祸。

如果你想一想下面这个问题，你就会明白做这件事为什么需要有丰富的经验：为什么这个老猎人所放的火会迎着火烧去，而不朝相反的方向烧呢?要知道风是从大火那方面吹来，把火带到旅客身旁来的。似乎这位老人所放的火应当不迎着火海烧去，而



要顺着草原后退。假如当时真是那样，旅客们就不可避免地会被包围在火圈里烧死了。

那么这个老猎人到底有没有什么秘诀呢?

秘诀就在普通的物理原理的知识里。风虽然是从燃烧着的草原那一方面向旅客们吹来的，可是在火前面离火很近的地方，应该有相反的气流朝着火焰吹。原因是火海上面的空气热了以后会变轻，并且被没有遭到火灾的草原上来的各方面的新鲜空气排向上面。由此可知，在火的边界附近一定会有迎着火焰流去的气流。必须在火焰接近得能觉察出已经有空气在向大火流去的时候才动手迎着火放火。这也就是为什么这位老猎人不急于动手，而沉着地等待着适宜的时机的缘故。如果他在这种气流还没有出现的时候过早地把草燃着，那末火就会朝相反的方向蔓延开来，使人们的处境格外危险。可是也不能动手太迟，这也会把人烧死的，因为火逼得太近了。

能不能用沸水把水烧开

拿一个小瓶(普通小玻璃瓶或药瓶)，在里面灌些水，把它放在一个搁在火上的清水锅里。为了使小瓶不碰着锅底，应该把小瓶挂在铁环上。当锅里的水沸腾的时候，似乎瓶里的水也会跟着沸腾。可是不论你等多久，也等不到这个结果：瓶里的水会热，会非常热，但是总不会沸腾。沸水好像没有足够的热把水烧沸似的。

这种结果好像是出人意料的，可是它也是在意料之中的。为了把水烧沸，仅是把它加热到 100 摄氏度是不够的，还必须再给它很大一部分热，使水从液态变成气态。

纯水在 100 摄氏度的时候就沸腾。在普通条件下无论怎样对

它再加热，它的温度也不会再上升。这就是说，我们用来对瓶里的水加热的那个热源的温度既然只有 100 摄氏度，那它能使瓶里的水达到的温度也只有 100 摄氏度。这种温度的平衡一经来到，就不再会有更多的热量从锅里的水传到瓶里。

因此，用这种方法来对瓶里的水加热，我们就不能使它得到转变成蒸汽所必需的那份额外的“潜热”(每 1 克 100 摄氏度的水还需要约 2 000 焦以上的热才能转变成蒸汽)。这就是小瓶里的水无论怎样加热总不能沸腾的缘故。

可能会发生这样一个问题：小瓶里的水和锅里的水有什么分别呢?要知道在小瓶里的也同样是水，只是同锅里的水隔着一层玻璃罢了，为什么瓶里的水就不能同锅里的水一样沸腾呢?

就是因为这层玻璃阻碍着瓶里的水，使它不能同锅里的水一起对流。锅里的水的每一个分子都能直接跟灼热的锅底接触，而瓶里的水就只能同沸水接触。

所以用沸的纯水来烧沸水是不可能的。可是如果向锅里撒一把盐，情况就不同了。盐水的沸点不是在 100 摄氏度，而是要略微高一些，因此，也就可以把玻璃瓶里的纯水烧沸了。

能不能用雪来烧沸水

“如果说连用沸水来烧沸水都不行，那就更不必说用雪来把水烧沸了！”有的读者会这样回答。可是别先忙着回答，最好先做一个实验，哪怕就是用我们刚才用过的那种小玻璃瓶来做都可以。

在瓶里装半瓶水，把它浸在沸腾的盐水锅里。等瓶里的水沸腾了，就把瓶子从锅里拿出来，很快地用预先准备好的很紧的塞子把瓶口塞住。现在请你把瓶子倒过来。等到瓶里的水不再沸腾，就用沸水来浇瓶子——这时候水不会再沸腾起来。可是如果



你在瓶底上放一些雪，或者就像图232所画的那样用冷水来浇它，这时候你就可以看到水又在沸腾了……雪竟做了沸水所不能做到的事情!

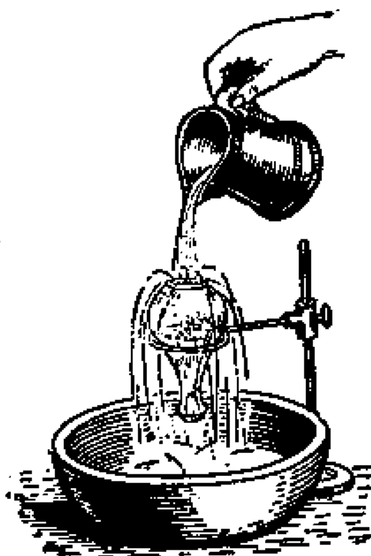


图232　用冷水浇烧瓶，瓶里的水会沸腾起来

尤其叫人觉得莫名其妙的，是这个瓶子摸上去并不特别烫手，只是有些热罢了。可是你亲眼看到瓶里的水是在沸腾着啊!

这里的秘密在于雪把瓶壁冷却了，因此瓶里的蒸汽就凝成水滴。又因为瓶在水锅里沸腾的时候，瓶里的空气已经被赶了出去，所以现在瓶里的水受到的压力要比以前小得多。我们知道当加在液体上的压力减小的时候，它的沸点也会降低的。因此在我们这个瓶里，虽然也是沸水，但是并不怎样烫手。

如果瓶壁非常薄，那末瓶可能会因蒸汽的突然凝缩而发生某种类似爆炸的情况。外面空气的压力由于瓶里没有够大的反抗力把它抵住，能把瓶子压破(顺便说起，你可以看出在这里用“爆炸”这个名词是不很合适的)。所以最好用圆形烧瓶(瓶底凸出的烧瓶)，以便让空气压在拱形底上。



图233　洋铁箱冷却的时候发生的意外结果

最安全还是用盛煤油或盛植物油的洋铁箱来做这个试验。用这种箱子烧沸一点水以后，把箱盖旋紧，再用冷水浇它。这时候装满蒸汽的洋铁箱会被外面空气的压力压扁，因为箱里的蒸汽受冷以后已经变成水。洋铁箱会变形得像被重锤击过一样(图233)。

“气压计汤”

马克·吐温在他所写的《漫游国外记》里谈到他的一次在阿尔卑斯山上的旅行，里面的事实当然是臆造的：

我们的不愉快算是完结了，所以人们又能够休息一下，而我也终于有可能去注意这次远征的科学方面的工作了。首先我想用气压计来测量一下我们所在地的高度。可是遗憾得很，竟没有得到任何结果。我从读过的科学书里知道，也许是温度计，也许是气压计，必须煮了以后才能指示出度数来。究竟是哪一个应当这样，我现在可说不准，所以决定把这两种仪器都拿来煮。



图234　马克·吐温的“科学考察”

然而还是得不到任何结果。我检查了这两件仪器，却发现它们都被煮坏了：气压计上只剩了一根铜指针，在温度计的盛水银的小球里，也只有一小点水银在晃动……

我找到了另一个气压计，这是一个全新的、极好的仪器。我把它放在炊事员煮着豆羹的瓦罐里，煮沸了半小时。这却使我得到了意外的结果：仪器完全不再起作用了，而汤却有了气压计的强烈的滋味。我们那位炊事员是个很聪明的人，就把菜单上的汤名换了一个新名



字。这道新的菜大家都很赞美，使我不能不每天叫人拿气压计去做汤。气压计当然是全都损坏了，可是我并不怎样可惜它。它既然不能帮助我确定高度，我还要它做什么呢？

抛开里面的笑话不谈，让我们来回答一个问题：到底哪一个应该"煮"一下，是温度计还是气压计？

是温度计。从以前做过的试验里我们看到，水面上的压力越小，水的沸点就越低。因为随着山坡的升高，大气压力减小了，所以水的沸点也就应当跟着降低。事实上，我们也查出了纯水在各种不同的大气压力下的沸点。

沸点(摄氏度)	气压(毫米水银柱)[1]
101	787.7
100	760
98	707
96	657.5
94	611
92	567
90	525.5
88	487
86	450

在瑞士的伯尔尼，平均的气压是 713 毫米水银柱，所以那里的水的沸点在器皿里开着时是 98 摄氏度；而欧洲的勃朗峰，气压是 424 毫米水银柱，沸水的温度就只有 84.5 摄氏度。每上升 1 公里，水的沸点要下降 3 摄氏度。所以我们如果测量出了水沸腾时候的温度(照马克·吐温的说法，就是如果我们把温度计

〔1〕760 毫米水银柱 = 1.05×10^5 帕。全书同。



"煮一下"），那末查一下相当的表，就可以知道这个地方的高度。为了这个，当然要预先准备好一张表，关于这一点，马克·吐温是"简直"忘记了。

为这个目的用的仪器叫做测高温度计。这种仪器携带起来和金属气压计一样方便，可是它的精确度却比气压计高得多。

气压计当然也可以用来测量一个地方的高度。它不必"煮沸"就能直接指出大气的压力：我们升得越高，气压就越小。可是，这时候也得要有表来告诉我们，空气的压力是怎样随着海拔的高度而减小的，或者得知道有关的算式。所有这一切，我们这位幽默家好像都没有弄清楚，所以才闹出了煮"气压计汤"的笑话。

沸水永远是烫的吗

勇敢的勤务兵宾·茹夫——凡是读过儒勒·凡尔纳的长篇小说《赫克特尔·雪尔瓦达克》的读者，一定都跟他很熟悉——坚决地认为，只要是沸水，那就无论什么时候、什么地方都是一样热。如果不是机会凑巧把他跟他的司令官雪尔瓦达克一起被抛到了……彗星上，那他就会一辈子这样想。这个行踪不定的彗星同地球相撞了，并且恰好把地球上这两位主人公所在的地方撞了下来，使他们不得不跟着彗星的椭圆形轨道前进。就在这时候，这位勤务兵第一次在自己的经验里看出，沸水并不是到处都是一样热的。这个发现是他在准备早餐的时候意外得到的。

> 宾·茹夫把水倒进锅里，把锅放在炉子上。他等着水沸，以便把鸡蛋放进去。这些鸡蛋在他看来似乎是空的，因为它们很轻。



不到两分钟，水已经沸了。

“真见鬼！现在火是怎样烧的！”宾·茹夫高声说。

“不是火烧得更旺了，”雪尔瓦达克想了一想答道，“是水沸得更快了。”

于是他从墙壁上取下温度计，插在沸水里。

温度计告诉他沸水只有66摄氏度。

“啊！”军官叫道，“水竟不是在100摄氏度沸腾，才到66摄氏度就沸腾了！”

“是吗？长官！……”

“是的，宾·茹夫，现在你得把鸡蛋煮15分钟才行。”

“那它们不都硬了吗？”

“不会硬的，老朋友，15分钟刚够把它们煮熟。”

这种现象的原因，显然是大气的高度已经减小，地面上的空气柱大约已经缩短了3/4。水在这样小的气压下，当然不到100摄氏度，而是到66摄氏度就沸腾了。同样的现象在高度达到11 000米的山上大概也会出现。假如这位军官身边有一个气压计，它一定会把气压降低的情况告诉他。

对于这两位主人公所见的现象，我们倒不必去怀疑：他们说水在66摄氏度就沸腾了，我们可以把它当做事实。可是我们十分怀疑，他们生活在这样稀薄的大气里，怎么会还觉得很好过。

《雪尔瓦达克》的作者说，类似的现象也可以在11 000米的高处看到，这是完全正确的。在那里，一算就可以算出，水的沸点的确应当是66摄氏度[1]。不过在这种地方，空气的压强应当等于高190毫米的水银柱——恰好是正常气压的1/4。在稀薄

[1] 如果像我们前面说的那样(见第391页)，每升高1公里，水的沸点要降低3摄氏度，那末为了使水的沸点降低到66摄氏度，就必须升高到$\frac{34}{3}\approx 11$公里的地方。

到这种程度的空气里，呼吸差不多已经不可能了！因为这样的高度已经是在平流层里了！我们知道，不带氧气面具飞到这种高度的飞行员，会因为空气不够而失去知觉，而雪尔瓦达克和他的勤务兵竟觉得还可以过得去。好在雪尔瓦达克手里没有气压计，否则小说家也许还要强迫这个仪器不照物理学原理报告气压哩。

假如这两位主人公不是落在这个幻想的彗星上，而是落到了大气压强不到 60 ～ 70 毫米水银柱的火星上，那他们的沸水还要凉些——只有 45 摄氏度。

相反的，在气压比地面高得多的深矿井的底部，却可以得到十分热的沸水。在深达 300 米的矿井里，水要到 101 摄氏度才沸腾，在深达 600 米的深处则是 102 摄氏度。

蒸汽机的锅炉里的水也是在极高的压力下沸腾的，所以它的沸点也极高。例如在 14 个大气压下，水的沸点是 200 摄氏度。反过来，在空气泵的罩子底下，可以使水在普通的室温里剧烈地沸腾起来。那就是说，我们在 20 摄氏度的时候就能够得到沸水。

烫手的冰

刚才我们谈过了凉的沸水。还有一种更奇怪的东西：热冰。我们习惯上认为，水的固体状态不能在 0 摄氏度以上存在。可是物理学家布里治曼的研究告诉我们却不是这样：在极高的压力下，水能够在比 0 摄氏度高得多的温度里变成固体，并且保持固体状态。布里治曼又指出，冰不止有一种，而有好几种。有一种冰，他叫它为“第五种冰”，是在 20 600 个大气压下得到的，它在 76 摄氏度的温度里还能保持着固体状态。它可能会烫坏我们的手指，假如我们能够摸到它的话。可是我们没有可能跟它接



I，因为“第五种冰”是在最好的钢制成的厚壁容器里用极强的E力机加上极大的压力才制成的。所以我们不能看到它或用手拿它。我们只能用间接的方法来知道这种“热冰”的性质。

说来很有趣，“热冰”的密度比普通冰高，甚至比水高：它的密度是 1.05×10^3 千克/米^3。它在水里应该会下沉，而不像普通冰那样会浮在水面上。

用煤来取冷

煤是用来取暖的，但是用它来取冷也不是什么不可能的事。在一种叫做“干冰”的制造厂里，每天都在用煤取冷。在这种工厂里，人们把煤放在锅炉里燃烧，然后把得到的烟道气炼净，并且用碱性溶液吸收里面所含的二氧化碳气。再用加热的方法把纯净的二氧化碳气从碱性溶液里析出来，放在 70 个大气压下冷却和压缩，使它变成液体。这液态的二氧化碳就装在厚壁的筒子里，送到汽水工厂和其他需要它的工厂里去使用。它的温度已经低到可以使土壤冻冰。在建造莫斯科地下铁道的时候，就曾经利用它做过这个工作。可是有许多地方还得使用固体二氧化碳，固态二氧化碳就叫干冰。

干冰，就是固体的二氧化碳，是让液态二氧化碳在低压下迅速蒸发而制成的。一块块的干冰，就外形看来，与其说它像冰，不如说它像压紧的雪。一般说来，它在许多方面都和冰有分别。二氧化碳的冰比普通冰重，在水里会下沉。它的温度虽然非常低(零下 78 摄氏度)，可是你如果小心地拿一块放在手里，你的手指却觉不出它冷：当我们身体和它接触的时候，它就产生二氧化碳气，保护你的皮肤不受冷。只有在紧紧握住干冰块的时候，我们的手指才会有冻伤的危险。

“干冰”，这个名称非常能说明这种冰的主要物理性质。它自己无论在什么时候都不会湿，同时也不会润湿周围任何东西。受了热后，它立刻变成气体，并不经过液体状态：二氧化碳是不能在一个大气压下存在有液体状态的。

干冰的这一特性和它的十分低的温度结合在一起，就使它在实用上变成了没有别的东西可以替代的冷却物质。用二氧化碳的冰来冷藏食物，不但不会潮，并且还由于形成的二氧化碳气有抑制微生物生长的能力，保护食物不腐败，因此在食品上不会出现霉菌和细菌。昆虫和啮齿类动物也不能在这种气体里生活。最后，二氧化碳气还是一种可靠的防火剂：把几块干冰抛在燃烧着的汽油里，就能使火熄灭。干冰在工业和日常生活里都有广泛的用途。

“饮 水 小 鸭”

有一种中国的儿童玩具，谁见了都觉得奇怪。它的名字叫“饮水小鸭”。把这小鸭放在一杯水前面，小鸭就会俯下身去把嘴浸到杯里,“喝”完一口水，又直立起来。可是直立一会儿，又会慢慢俯下身去，等到鸭嘴够到了水,“喝”了一口，又会直立起来。这种玩具是“不花钱”的发动机的一个典型。它的活动的机构是很巧妙的，请看图 235 和图 236，小鸭的“身体”是一根玻璃管，管的上端是一个小球，做成鸭头的样子，连着扁嘴。管的下端连一个较大的玻璃球，也是密封的。球

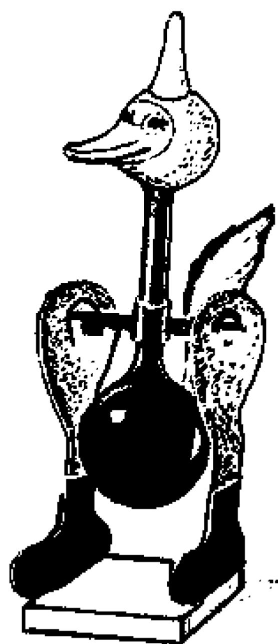


图 235 “饮水小鸭”



里面装有液体，玻璃管下端浸没在液面下。

要使小鸭能够活动，必须用水打湿鸭头。鸭头打湿以后，有一段时间小鸭还能保持直立的姿势，因为下端的玻璃球和里面的液体比鸭头重。现在看它会发生什么变化。我们看到液体开始沿着玻璃管上升(图236)。当液面升到玻璃管上口的时候，上部就变得比下部重，于是小鸭就嘴向前把身子俯到杯子上。当小鸭的身子俯到水平位置的时候，下端玻璃管的开口就会露出液面来，玻璃管里的液体也就流回下端的大玻璃球。于是小鸭的“尾部”又变得比头部重，使小鸭恢复直立的位置。现在我们明白了这个问题的力学方面的原理：液体的升降改变了重力的分布情况，简单地说，就是改变了重心。可是使液体上升的，又是什么力在起作用呢?

小鸭内部的液体是醚。醚在室温里很容易蒸发，而醚的饱和蒸气所产生的压力又会随温度的改变而剧烈改变。

在小鸭直立着的时候，可以看出有两个独立的醚蒸气区域：一个在头部，一个在尾部。

鸭子的头部有一种奇妙的性能：只要用水把它打湿，那里的温度就会变得比周围温度稍微低一些。要做到这一点也不困难，只要把鸭头的表面用善于吸水又容易让水分蒸发的多孔材料来做就成了。水分急剧蒸发的时候，鸭头上的温度会变得比下面玻璃

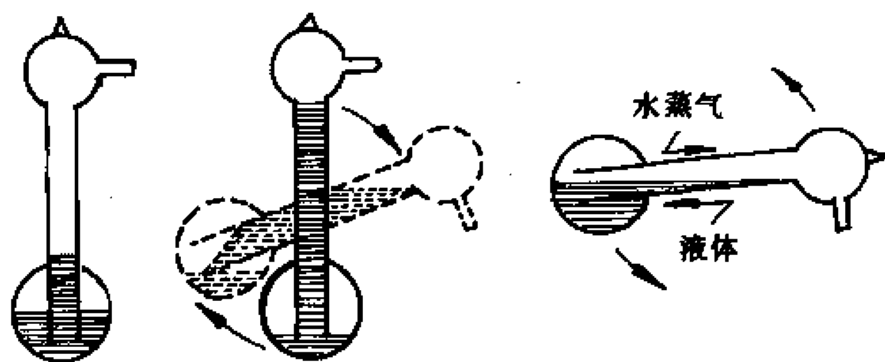
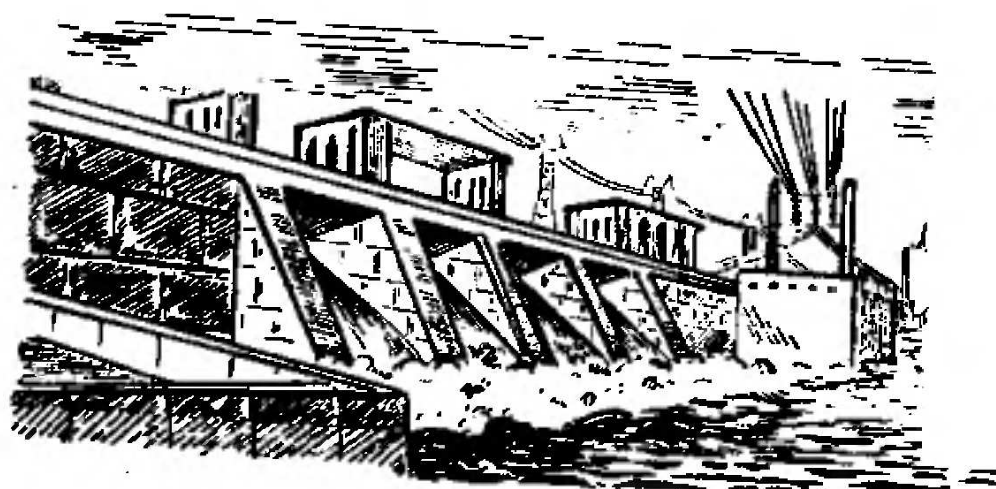


图 236　“饮水小鸭”构造上的“秘密”

管和大玻璃球里的温度低。这又转过来会使头部那个小玻璃球里的饱和蒸气冷凝，压力也就随着降低。于是下部那个大玻璃球里的比较大的压力就会挤压液体，使它顺着玻璃管上升。重心移动位置了，小鸭就慢慢俯下身子一直到水平的位置。在这个位置里，有两个过程各自独立地进行着。第一，小鸭的嘴浸了一下水，这样就又把自己头上的棉套子打湿。第二，上下两部分的饱和蒸气混合了，压力也变得一样了(由于吸收了周围空气的热量，蒸气的温度略有上升)，同时玻璃管里的液体，也在本身的重力作用下流入下端的大玻璃球。于是小鸭又直立了起来。

这个玩具会不断地自动活动下去，只要让它头上的棉套子继续被打湿，而周围空气的湿度又不太大，能够保证正常的蒸发，也就是保证头部的温度能够相对地降低。这样看来，小鸭头部的水不断蒸发所吸取的周围空气的热量，就是使这种奇妙的小鸭能够活动的原动力。这种小鸭是“不花钱”的发动机的一个极其明显的例子，但它并不是什么“永动机”。



18 磁和电

“慈　石”

中国“磁石”这个名字，就是从“慈石”转变过来的，意思是，磁石吸引铁就像一个慈爱的母亲吸引自己的孩子一样。奇怪的是，居住在欧亚大陆另一端的法国人也是用类似的名称来称呼磁石的。法文“aimant”这个字也有“吸引”和“慈爱”的意思。

磁石的这种“慈爱”力量并不很大，所以希腊人称呼磁石做“赫丘利[1]石”是过于天真的。如果古代希腊人对磁石的那种微弱的吸引力都这样惊奇，那末当他们看到现代冶金工厂里的磁铁一次可以举起几吨重，又该把它叫作什么呢？当然，这不是天然的磁石，而是电磁铁，就是把电流通过铁心周围的线圈使铁磁化制成的。但是在这两种情况下起作用的都是同一种性质——磁性。

我们不能认为，磁只能对铁起作用。有许多物体也能受强大的磁力的作用，虽然不像铁那样显著。金属当中的镍、钴、锰、铂、金、银、铝都能被磁铁吸引，只是被吸引的力比较小。还有一些所谓反磁性的物体。例如锌、铅、硫、铋，性质尤其特别：它们能被强大的磁铁所排斥！

液体和气体也有被磁铁吸引或排斥的性质，不过作用十分微弱，必须是非常强大的磁铁，才能显示出对这些物质的作用。例如纯净的氧气就有顺磁性，就是说，磁能够吸引它。如果我们在肥皂泡里装满氧气，然后把它放在强大的电磁铁两极中间，这时候肥皂泡就会受那看不见的磁力的牵引，在两极中间伸长开来。放在强大的磁铁两极中间的烛光会改变自己的通常的形状，明显地告诉了我们它对磁力的敏感性(图 237)。

---

〔1〕赫丘利是希腊神话中一位大力士的名字。



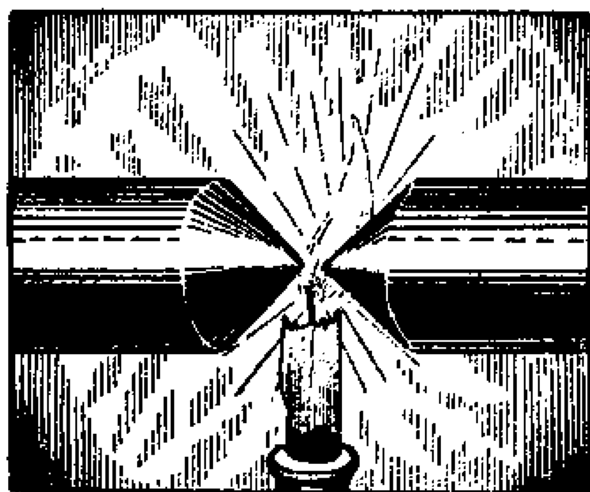


图 237　电磁铁两极之间的烛光

关于指南针的问题

我们向来都认为，指南针永远是一头指北，一头指南的。如果有人向我们提出下面这个问题，我们一定会觉得这问题是荒谬的：在地球上什么地方，指南针两头都指北？

同样荒谬的是问：在地球上什么地方，指南针两头都指南？

碰到这样的问题，你肯定会说，在我们地球上是没有、也不可能有这样的地方的。可是事实上这样的地方是有的。

我提醒你一下，地球的磁极同地理上的南北极并不一致。这样你也许就会猜到所问的地点是在地球上的什么地方了。我问你，放在地理的南极上的指南针，它指的是什么方向呢？它的一头当然要指着附近的那个磁极；另一头指着和这相反的一方。可是你从地理上的南极出发，无论走哪个方向，你都是向北走的。地理上的南极没有别的方向。在它四周，处处都是北方。所以放在那里的指南针两头都是指北的。

同样，如果把指南针移到地理上的北极，那么它的两头都应该指南了。

磁感线

图 238 是照着相片画下来的一张有趣的图画：画上有一只人的臂膊横放在电磁铁的两极上，臂膊上向上竖着一簇簇铁钉，好像刚毛一样。臂膊本身是完全感觉不到磁力的：看不见的磁感线穿过臂膊的时候，是一点也不会暴露自己的存在的。可是这些铁钉在磁力的作用下，却顺从地按照一定的次序排列着，让我们看到那些依着曲线从一极走向另一极的磁感线的方向。

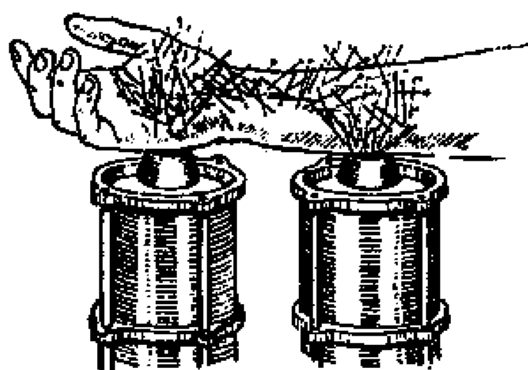


图 238　磁力透过了人手

人类没有能感觉磁性的器官，所以我们只能推测在每一块磁铁的周围都有磁力。[1] 可是用间接的方法来显示磁力的分布图也并不很困难。做这个试验最好是用铁屑。在一张光滑的厚纸或玻璃板上均匀地撒上一薄层

---

[1] 设想一下我们如果有了直接能感觉到磁性的器官，那倒是很有趣的。据说，有人曾经成功地把一种磁性感觉移植在龙虾身上。他看出小龙虾会给自己的耳朵装进极小的石头，这些小石头由于自己的重力能对龙虾的部分平衡器官——感觉纤维——起作用。类似的小石头叫做耳石的，人类的耳朵里也有，位置就在基本的听官附近。它们是在竖直的方向里起作用的，所以能指出重力的方向。他就给龙虾移植上了一些铁屑来代替小石头，当时龙虾并不觉得怎样。可是在把一块磁铁拿到龙虾身边的时候，龙虾就使自己的身体落在一个平面上，这平面跟磁力和重力的合力垂直。

近年来，人们把上面说的这个试验的形式改进了一下，成功地应用在人身上。有人曾经把一些小铁屑粘在人的耳鼓膜上，结果，人耳就能像察觉声音的振动一样，察觉磁力的振动。



铁屑；拿一块普通磁铁放在厚纸或玻璃板下面，再轻轻敲厚纸或玻璃板来抖动铁屑。磁力是能自由地穿过厚纸或玻璃板的，所以铁屑在磁铁的作用下就要磁化；磁化了的铁屑在我们抖动它们的时候，就会和厚纸或玻璃板分开，并且在磁力的作用下很容易转过身来，落在磁针在这一点应取的位置上，也就是沿着磁感线排列起来。结果使我们明显地看出那些看不见的磁感线是怎样分布的，得到像图 239 所画的图。磁力造成了一组复杂的弯曲的线。你可以看出铁屑怎样从磁铁的每一极辐射开来，又怎样在两极中间连接起来，形成一些短弧和长弧。这样，铁屑就让我们亲眼看到了物理学家所想象的情景，就是每一块磁铁周围存在着的看不见的情景。离磁极越近，铁屑组成的线就越密，越清楚。相反地，离磁极越远，线就越稀，越不清楚。这就明白地向我们证明了，磁感线是随着距离的加长而变弱的。

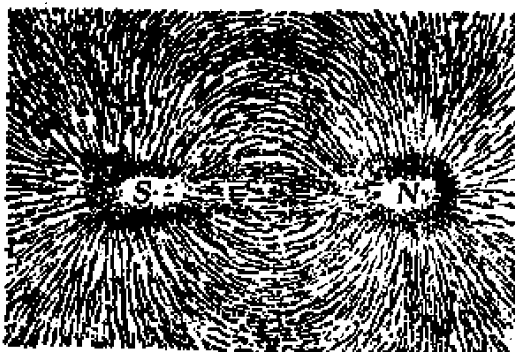


图 239　排列在下面放着磁铁的厚纸上的铁屑（根据相片画的）

怎样使钢磁化

读者常常会提出这个问题。为了答复他们，首先应该说明磁铁跟没有磁化的钢有什么分别？含在磁化了的或是没有被磁化的钢里的每一个铁原子，我们都可以看成是一个小磁铁。在没有被磁化的钢里，这些原子磁铁是没有次序地排列着的。因此，里面每一个小磁铁的作用，都被相反方向排列着的小磁铁的作用所抵消（图 240）。相反地，在磁铁里，所有那些基本小磁铁都整齐地

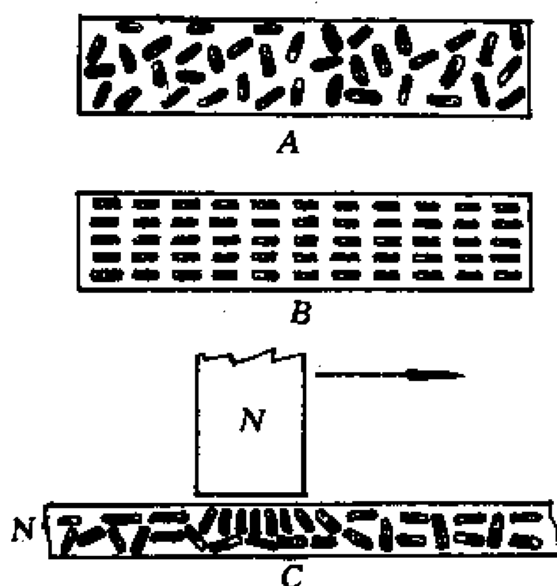


图 240 A. 排列在没有磁化的钢里的原子小磁铁

B. 排列在磁化了的钢里的原子小磁铁

C. 磁铁的磁极作用在没有被磁化的钢上的情况

排列着，所有同性的磁极都朝着同一方向，像图 240 *B* 所示的那样。

当我们用一块磁铁来摩擦钢条的时候，会产生些什么情况呢？磁铁会用自己的吸力使钢里的基本小磁铁转过身来，让同性的磁极都朝着同一方向。图 240 *C* 清楚地指出这种情况：基本小磁铁一开始就使自己的南极指向磁铁的北极。等磁铁移过一段路，它们就顺着磁铁运动的方向排列起来，使所有的南极都朝着钢条的中部。

从这里也容易明白，在使钢块磁化的时候，应该怎样来运用磁铁：应该把磁铁的一极放在钢条的一头，紧紧地压在上面，然后顺着钢条擦过去。这个方法是最简单也是最古老的一种磁化方法，只适宜用来制取很小而且力量很弱的磁铁。强大的磁铁是利用电流制取的。

庞大的电磁铁

在冶金工厂里，可以看到搬运十分重的重物的电磁起重机。这种起重机在举起和移动铁块的工作上对铸钢厂和这一类的工厂作了相当大的贡献。几十吨重的大铁块或机器零件，都不必捆扎就能很方便地用这种磁铁起重机来搬运。铁片、铁丝、铁钉、废

铁和别的各种铁料，用别种方法来搬运都很麻烦，用了电磁起重机，就能不装箱不打包，很方便地搬来搬去。

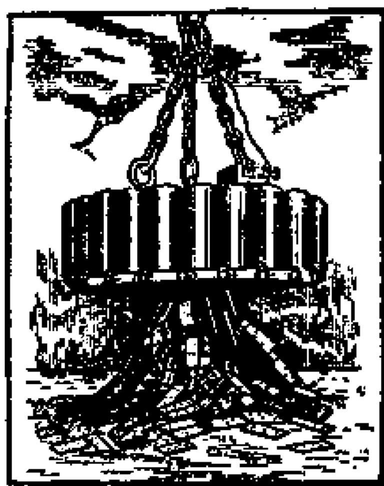


图 241　搬运铁片的电磁起重机

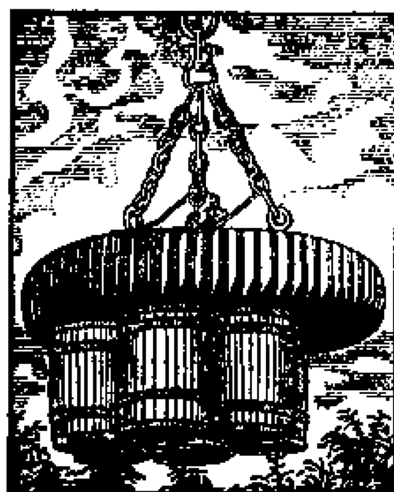


图 242　搬运整桶铁钉的电磁起重机

在图 241 和图 242 中，你们可以看到磁铁的这种有效的功用。要收集和搬运一堆堆的铁片是非常麻烦的，可是像图 241 所画的强大的电磁起重机却能够同时收集和搬运它们。这里的好处不但是力量经济了，并且工作简化了。在图 242 里你可以看到电磁起重机搬运装在木桶里的铁钉，一次竟可以举起 6 桶！有一家冶金工厂在不久以前使用了 4 台电磁起重机，每一台起重机可以一下子搬运 10 根铁轨，这些起重机就代替了 200 个工人的体力劳动。在起重机工作的时候，用不着担心这些重物在上面缚得牢不牢。只要电磁铁的线圈里电流不停，那就一块碎片也不会从上面落下来。看不见的磁力比坚固的螺钉和链条都更可靠。

可是如果线圈里因为某种原因断了电，那就必然要闯祸了。这样的事故，从前曾经发生过。我们从一本技术杂志里可以读到这样一则消息："在美国一家工厂里，电磁铁举着用车皮装来的铁块，准备把它们投进炉里。突然尼亚加拉瀑布的发电站出了事故断了电。巨大的金属块从电磁铁上掉下来，整个砸在工人头上。为了避免再发生类似的不幸事件，并且为了节省电能的消耗，就在电磁铁上装了特别的装置。在要运输的物件被磁铁提起来以

后，就有些坚固的钢爪从旁边落下来紧紧地扣住它们，随后重物就由这些爪提着；而电流在搬运的时候却可以中断一会。"

图 241 和图 242 所画的这两台电磁起重机，直径都有 1.5 米；每台起重机能提起 16 吨重物(一节货车)。一台这样的电磁起重机一昼夜可以搬运重物 600 吨以上。有一些电磁起重机一下子能提起 75 吨重物，也就是提起整个机车。

看了电磁起重机的工作情况以后，有的读者可能会有一种想法：如果使用电磁起重机来搬运灼热的铁块，那该多方便啊！可惜这只有在一定的温度里才能这样做，因为灼热的铁是不能磁化的。磁铁被加热到 800 摄氏度就会失去磁性。

现代的金属加工技术广泛地使用着电磁铁来支持住和移动钢、铁和铸铁的制件。人们已经造成了几百种不同的卡盘、工作台和别种装置，大大地简化和加速了金属加工过程。

磁力魔术

魔术家有时候也使用电磁铁，很容易想象出，他们借这种看不见的力会表演出多么精彩的戏法。《电的应用》这本名著的作者达里，曾经谈到一位法国魔术家演出时候的情况。他那一场戏法，在不知道内容的观众看来，真好像是有妖术似的。下面是那个魔术家的话：

> 在台上有一个不大的包着铁皮的箱子，箱盖上装有提手。我向观众说，请他们当中来一位气力大的人。有一位身材适中可是体格强壮的大力士应召上了台。他很有精神和满怀着自信心，略微带点开玩笑的态度，微笑着站在我的身旁。



“你力气很大吗?”我从头到脚打量着他，问道。

“是的。”他满不在乎地回答我。

“你相信你总是很有力气吗?”

“我完全有信心。”

“你错了，一会儿工夫我就能使你失去力气，使你软弱得像个小孩子。”

大力士轻蔑地微笑了一下，表示他不相信我的话。

“上这儿来，”我说，“提这个箱子。”

大力士弯着腰提起箱子，高傲地问道：

“还要做什么?”

“稍微等一等。”我回答。

这以后，我装出一副严肃的样子，并且用发命令的手势和庄重的声调对他说：

“你现在比女人还要软弱了。你再提一下这箱子看。”

大力士一点也没把我的魔术看在眼里，立刻又去提箱子。可是这一次箱子却出现了反抗力，无论他怎样用力，总不能挪动它，它好像固定在那里一样。这位大力士所用的力气的确是可以举起极大的重力的，可是这次却完全不顶事。他累得直喘气，最后只得羞惭满面地离开戏台。现在他开始相信魔术的力量了。

这位法国魔术家所表演的这场魔术的秘密很简单。原来箱子的铁底是放在一个强大电磁铁的磁极上的。在没有电流的时候，箱子是不难提起的；可是电磁铁的线圈里一通电，那就是两三个人也别想挪动它了。

电磁铁在农业上的用途

磁铁还有一种用途，说来更有趣味：它能在农业上帮助农民除掉作物种子里的杂草种子。杂草种子上有绒毛，能够粘在旁边走过的动物的毛上，因此它们就能散布到离母本植物很远的地方。杂草的这种在几百万年的生存斗争中获得的特点，却被农业技术利用了来除掉它的种子。农业技术家利用磁铁，把杂草的粗糙的种子从作物的种子里挑选出来。如果在混有杂草种子的作物种子里撒上一些铁屑，铁屑就会紧紧地粘在杂草种子上，而不会粘在光滑的作物种子上。然后拿一个力量足够强大的电磁铁去对它们作用，于是混合着的种子就会自动分开，分成作物种子和杂草种子两部分，电磁铁从混合物里把所有粘有铁屑的种子都捞了出来。

磁力飞机

在这本书中，我曾经提到过法国作家西拉诺·德·别尔热拉克的有趣著作《月国史话》。书里所谈的事情很多，有一件谈到一种有趣的飞机。这种飞机是靠磁力来飞行的，小说里的主人公就曾经乘着它飞到月球里。现在让我把书里的这一段直译在下面：

> 我叫人制造了一辆很轻的铁车，上了铁车并舒服地坐好以后，我就把一个磁铁球向上抛去。铁车于是也立



刻跟着上升。当我每一次接近磁球吸引我去的地方，我就重新把球往上抛。有时候，我只是简单地用手把球略微举高一些，铁车也会跟着上升去和磁球接近。在把球向上抛了许多次，铁车也上升了许多次以后，我就来到了我在月球上降落的地方。因为这时候我的手紧紧地握着磁球，所以铁车也紧靠着我不会离开。为了在降落的时候不跌伤，我就这样地抛球，使铁车的下降速度因球的吸引力而减慢。当我离开月面只有五六百米的时候，我就向降落的方向成直角地抛球，直到铁车十分接近月面为止。这时候我就跳出铁车，轻松地降落在沙上！

这里所描写的飞机是毫无用处的，关于这一点，无论是小说的作者或者读者，当然都不会怀疑的。但是我想一定有许多人不能正确地说出到底为什么这种设计会没有用处：是因为坐着铁车不能向上抛球呢，还是因为磁球不能吸引铁车?

不是的。坐在车里抛球是可以的，并且磁球有足够强的磁性的话，它也能够吸引铁车。尽管这样，这种飞机还是一点也不能向上运动的。

你曾经从小船上往岸上抛过重的东西吗?如果你抛过，那毫无疑义，你一定曾经注意到小船在这时候会向河心退去。你的肌肉在对所抛的物体加上推力使它向一个方向前进的时候，同时也把你的身体(连同小船)推向相反的方向。这里出现的就是我们以前说过许多次的作用力和反作用力相等的定律。在抛磁球的时候，这个定律也会发生作用。坐在车上用很大力气(因为球要吸引铁车)抛着磁球的人，不可避免地要把整个铁车往下推。等到后来磁球和铁车由于相互吸引而重新接近的时候，它们只是回到了原来的位置。因此很明显，就算铁车一点重力也没有，用抛磁球的方法也只能使它以某一个位置为中心做上下

摆动。用这个方法来使它一步步前进是不可能的。

西拉诺是17世纪中叶的人，这时候作用力和反作用力的定律大家还不知道，所以要求这位法国讽刺作家能够清楚地说出自己这个开玩笑的设计不合实用的道理，也是不切实际的。

同“穆罕默德的棺材”一样

有一次在用电磁起重机工作的时候，出现了一种有趣的情况。有位工人，看见电磁铁吸起了一个很重的铁环，环上有条短链子，链子固定在地板上，所以环和磁铁并不能接触：在环和磁铁之间还留着一掌宽的空隙。这时候的景象真是特别：一条链子竖直地朝上立在那里！磁力竟大到在链上攀着一个工人也能保持竖直。[1] 这时候恰好来了一位摄影家，赶着这有趣的时刻，把这情况摄了下来。我们在这里重印了这张悬在空中很像传说里的穆罕默德的棺材一样的人像(图243)。

这里就顺便来谈谈“穆罕默德的棺材”。伊斯兰教徒都深信那装着“先知”的遗体的棺材是上下没有任何支撑地悬在坟墓里的。

这是不是可能呢？

欧拉在他的《有关各种物理学资料的书信集》里曾经说道：“相传穆罕默德的棺材是由某种磁力支持着的；这似乎不是不可能的，因为有些人造磁铁是能举起450牛顿的重力的。”[2]

这样的解释是没有根据的。即使用上面说的方法(就是利用

〔1〕这表明电磁铁的吸引力非常强大，因为磁铁的吸引力是随着电极和被吸引的物体之间的距离加大而大大地减弱的。如果有一个蹄形磁铁，它和物体直接接触的时候，能吸引100克重物，那末在磁铁和重物之间隔一张纸，它的举重力就要减小一半。这也就是为什么一般不在磁铁的两端涂漆的缘故，虽然漆有防锈的作用。

〔2〕这段话是在1774年写的，那时候电磁铁还没有发明。



磁铁的吸引力)可以在一个时候里得到平衡，可是很小的推力，甚至空气的很小的动荡，也足够破坏它。这时候棺材不是落到地上，就是被吸向天花板。要使它保持不动，实际上是不可能的，就像不能使一个圆锥体立在它的顶点上一样，虽然在理论上这样竖立是可能做到的。



图 243　一条竖直的铁链，上面还挂着重物

不过，应用磁石，也的确完全可以产生像“穆罕默德的棺材”这种现象——只是所利用的不是它们之间的相互吸引力，相反的，是它们之间的相互排斥力。(磁铁不但能够相吸而且能够相斥这一点，连刚学习过物理学的人都常常会忘记。)大家都知道，同性的磁极是彼此排斥的。如果把两块磁化了的铁这样来放，使它们的同性磁极上下相叠，那它们就会相互排斥。如果上面一块磁铁的重力选择得当，就不难使它悬在下面一块的上面，而不跟它接触，维持着稳定平衡的状态。只需要几根用不能磁化的材料(像玻璃之类)做的支柱，就可以阻止上面那块磁铁在水平的平面上转动。传说里的穆罕默德的棺材可能就是在这类情况下悬在空中的。

最后，如果用磁铁的吸引力来影响运动着的物体，也可以出现这种现象。有人根据这种思想设计了一种没有摩擦力的电磁铁路(图 244)。这个设计富有教育意义，把它介绍给每一个爱好物理学的人，是有益处的。

电磁运输器

在这种电磁铁路上，车厢的重力被电磁铁的吸引力抵消了，所以它是完全失去重力的。所以如果我告诉你说，根据设计，这些车厢不是在铁轨上行驶的，不是在水里航行的，甚至也不是在空气里滑翔的——它们飞的时候任何支撑的东西都没有，什么也不接触，而是悬在看不见的强大的磁场线中的，你听了也就不会觉得奇怪了。由于它们之间不会有摩擦，所以当它们一进入运动状态，就能依靠惯性保持着原有的巨大速率前进，而不必再用机车来牵引。



图 244　电磁铁路和在奔驰的时候不发生摩擦的车厢

这个计划是这样实现的。车厢是在抽出了空气的铜管里运动的，使空气的阻力不妨碍车厢的运动。车厢底部的摩擦力也得消灭掉，方法是让车厢在运动的时候不同管壁接触，而由电磁铁的力把它维持在空中。为了这个目的，沿路在管子上面每隔一定距离得设置一个极强大的电磁铁。这些电磁铁吸引着在管里运动着的铁制车厢，不让它们掉下去。磁铁吸引力的大小，应当刚能使这些在管里奔驰着的铁制车厢总是留在管的“天花板”和“地板”之间，不让它接触任何一方。电磁铁把在它下面奔驰着的车厢吸向上面——可是车厢并不能因此就碰到



"天花板"，因为还有重力在拉它。在它刚要碰到"地板"的时候，下一个电磁铁又把它吸了上去……这样，这个始终被电磁铁抓着的车厢，就沿着一条波状线在真空里奔驰，没有摩擦，也没有推力，像宇宙空间里的行星一样。

那末车厢是什么样的呢?车厢像雪茄烟形状的圆筒，高 90 厘米，长大约 2.5 米。当然车厢还得严密地关闭着——因为它是在没有空气的空间里运动的。里面还得像潜水艇一样，有自动清洁空气的装置。

开动车厢使它出发的方法，也同以前所用的一切方法全不相同。也许只能拿放射炮弹来比喻它。而实际上这种车厢也真是像炮弹一样"射"出去的，不过所用的是电磁炮罢了。发射车厢的车站是根据螺线管的性质建造的，"螺线管"的导线在有电流通过的时候会吸引铁心。这个吸引过程进行得这样快，以至在足够长的线圈和足够强的电流的情况下，铁心能够获得极高的速度。在新式的磁力铁路上用来发射车厢的，正是这种力。因为在管的内部没有摩擦力，所以车厢的速度不会减小，它会按照惯性原理疾驶，直到车站上的螺线管命令它停止为止。

下面是设计者提出的一些详细情节：

我最初是用铜管来做的(铜管的直径是 32 厘米)，在它的上面有许多电磁铁，电磁铁下面的支架上有小车——那是一节铁管，前后都有轮子，前面装着"鼻子"，"鼻子"撞在一块由沙袋支住的木板上的时候，小车就会停止。小车重 10 千克，速度可以达到每小时大约 6 公里。超过这个速度，就由于屋子和环形管的面积的限制(环形管的直径是 6.5 米)，车就不能行驶。但是在我后来完成的设计里，出发站上的螺线管长到了 3 公里。这样，车的速度就很容易达到 800 ～ 1000 公里每小时。又因为管里没有空气，车同地板和天花板之间没有

摩擦，所以在它的持续行驶中不会消耗任何能量。

尽管建造的费用，特别是钢管本身的建造费用很高，可是毕竟不必在維持速度上消耗能量，又不必用驾驶员和车务员等等，所以每一公里的费用也只有千分之几戈比到2% 戈比。而双线每一昼夜的运输量，无论是上行或下行，都可以多到15 000人或10 000吨货。

火星人和地球上的人交战

古罗马的博物学家普林尼传下了当时曾经流行的一个关于磁铁山的故事，说在印度海边某处有这么一座山，它有一种非常的力量，能够吸引任何铁制的东西。所以如果有水手胆敢把他们的船驶近这座山，那他一定会倒霉的。山会把船上所有的铁钉、铁螺钉等都拔去，使船分解成一块块的木板。

这个传说后来又编入了《一千零一夜》里。

当然，这不过是传说。现在我们知道，磁铁山或含有丰富的磁铁矿的山的确是有的。但是，这种山的吸引力非常小，几乎等于零。像普林尼所写的那种山，在地球上从来没有过。

在今天，如果我们不用铁和钢来造船的部件，那并不是因为我们怕磁山，而只是为了这样研究地磁更合适。

科学小说家库尔特·拉斯维兹却利用普林尼传说里的思想，想出了一种可怕的武器，这种武器被他的小说《在两个星球上》里的火星人使用了来同地球上的军队作战。火星人拥有这种磁性武器(大概就是电磁铁)，简直不必同地球上的居民作战，在开战以前就解除了地球上的军队的武装。

下面就是这位小说家所描写的关于火星人和地球上的居民交



战时的情节：

一队出色的骑兵勇猛地向前冲去。并且看上去，似乎我们军队的奋不顾身的战斗意志终于迫使强大的敌人[1]想退却了，因为他们的飞船已经采取了新的行动。它们飞上了高空，好像集合了准备撤退。

可是在这同时，从上面落下了一种张得很开的黑色的东西，现在刚出现在战场上空。这个四周都有空中船舶环绕着的东西，像飘扬着的被单一样，很快地在战场上空大大地展开了。这里的骑兵第一连已经落在它的作用范围里了——奇异的机器立刻把整个团遮盖住了。它的作用是意外的、古怪的！从战场上传来了惊心动魄的号叫声。马和骑士一堆堆地散乱在地上，而空中却像乌云一样满布着刀剑和马枪，它们砰砰啪啪地都向机器飞去，并且粘附在上面。

机器略微向旁边滑过去了一些，把自己虏获的铁器都扔在地上。它又两次飞了回来，并且差不多收缴了地面上所有的兵器。当时没有一个人有力量能够抓住自己的刀枪不放手。

这种机器是火星人的一种新发明：它有一种不可抗拒的力量，能够把一切钢和铁做的东西吸引过去。火星人靠这种飞翔在空中的磁铁的帮助，从敌人手里夺得了武器，而自己却又受不到丝毫伤害。

空中磁铁很快地继续向步兵逼近。那些步兵拼命用双手抓住自己的枪，可是不顶事——不可抗拒的力量还是把它们从手里夺走了；许多不肯放手的，连人带枪都被吸到了空中。几分钟里第一团全被缴了械。机器又向

〔1〕指火星人。

前飞去，去追赶那正在城里行进的另一团，使他们受到同样的遭遇。

接着，炮队也落入了同样的命运。

表 和 磁

读完了上面一段文字后，自然会产生一个问题：难道我们就不能防御磁力的作用，就不能用某种磁力透不过的障壁把它挡住吗?

这是完全能够的。假如预先采取了适当的措施，那个幻想出来的火星人的发明也是可以防御的。

说也奇怪，不能透过磁性的物质，原来就是容易磁化的铁本身！一个放在铁制的环里的罗盘，它的指针不会被放在环外的磁铁吸引就是明证。

铁壳可以保护怀表里的钢制机件不受磁力的影响。假如你把一个金表放在一个强力的蹄形磁铁的磁极上，那末所有的钢制机件，首先是那摆轮上的游丝[1]就会磁化，使表停止不走。就是把磁铁拿走以后，你也不能把表恢复到原来状态，因为钢制机件都保留着磁性。你得把表彻底修理一下，把许多机件换成新的。因此，切不要用金表来做这个试验：它太贵了，

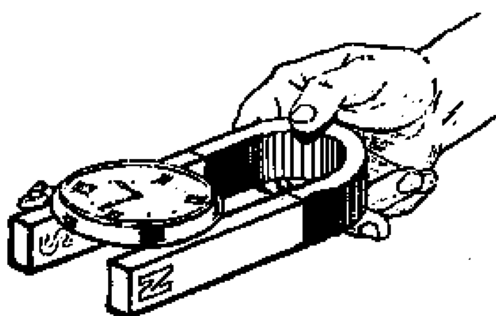


图 245 什么东西能够保护表里的钢制机件不磁化

〔1〕这只是指一种不是用特殊的叫做因钢的合金制的游丝而说的。在镍铁合金的成分里虽然含有铁和镍，但是不会磁化。



坏了可惜。

可是，如果你有一个紧密地盖着铁壳或钢壳的表，就可以大胆地去做这个试验——磁力不能透过钢和铁。你如果把这样的表拿到强大的发电机的线圈附近，它的精确度一点也不会受到影响。所以对一个电气技工来说，这样便宜的表倒是最理想的表。至于金表和银表，很快就会因为磁的作用变成没有用处。

磁力“永动机”

在人类想发明“永动机”的历史里，磁铁也曾经扮演过不太小的角色。失败的发明家曾经费尽心思想利用磁铁来建造自己能够永远运动下去的机器。下面介绍的一种磁力“永动机”，是17世纪的英国人约翰·维尔金斯(捷斯特城的主教)设计的。

在小柱上(图246)放一个强力的磁铁 *A*。两个斜的木槽 *M* 和 *N* 叠着倚靠在小柱旁边。上槽 *M* 的上端有一个小孔 *C*，下槽 *N* 是弯曲的。这位发明家想，如果在上槽上放一个小铁球 *B*，那末由于磁铁 *A* 的吸引力，小球会向上滚，可是滚到小孔处，它就要落到下槽 *N* 上，一直滚到 *N* 槽的下端，然后顺着弯曲处 *D* 绕上来，跑到上槽 *M* 上。在这里，它又受到磁铁的吸引，重新向上滚，再从小孔里落下去，沿着 *N* 槽滚下去，然后再经过弯曲处回到上槽里来，以便重新开始运动。这样，小球就会不停地前后奔走，进行“永恒的运动”。

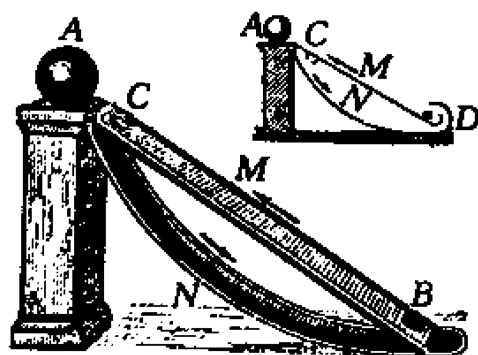


图246　想象中的“永动机”

这个发明的荒谬的地方在哪里呢?

要指出它也并不难。为什么发明家认为小球沿着 N 槽滚到它的下端以后，还会有一种速度，使它能够顺着弯曲处 D 绕到上面来呢?假如小球只是在重力这一个作用下滚动的，那它是不难顺着弯曲处上升的，因为那时候它是加速地向下滚的。可是这小球是在重力和磁力这两种力的作用下滚着的，并且磁力是这样强，可以强迫小球从位置 B 上升到 C。所以小球沿着 N 槽滚动的时候不能加速前进，而是要变慢的；即使它能滚到 N 槽的下端，也无论如何不能积蓄起一种速度，使自己能绕着弯曲处 D 上升。

上面所说的那个设计，后来在改变了形状的情况下又重新出现了许多次。有一种类似的设计，说也奇怪，竟在 1878 年，也就是在能量守恒定律确立 30 年以后，在德国取得了专利权!这位发明家把他那磁力“永动机”的荒谬的基本观念竟掩饰得这样高明，甚至迷惑了颁发专利特许证的技术委员会。虽然按照章程，凡是和自然定律相矛盾的发明，都不应当发给发明专利特许证，这一次发明却取得了专利权。但是这个惟一获得“永动机”专利权的幸运儿大概很快会对自己的创造失望，因为只过了两年，他就停止缴纳专利税了，并且这种可笑的专利也丧失了法律效力：“发明”成了大家的财产，但是谁也不需要它。

博物馆里的问题

有些古书已经这么陈旧，在翻的时候无论怎样小心，书页都要破损，而在博物馆的实际工作里，又常常有翻阅它们的必要。这样的书页应当怎样去翻它呢?

在这种情况下，只有用电来解决问题，就是使书卷充电。书里相邻各页得到同性的电荷以后，就会彼此排斥，因而毫不损伤



地一页页分了开来。这样分离开的书页，无论是用手去翻它，或是用结实的纸去裱它，就都比较容易。

电线上的飞鸟

大家都知道，如果人触到通有电流的电车的电线上或者高压电线上，那该是多么的危险。不但人触着它要死，就是大的动物触着它也会死。我们常常听到牛和马因触到断下来的电线而被电打死的事情。

那末鸟为什么却能够平安无事地停在电线上呢?这种事情常常可以在城市里看到(图 247)。

为了懂得强电流不会伤害鸟类的原因，应该注意这样一件事：停在电线上的鸟的身体，好像是电路的一个分路，它的电阻比起另一个分路(鸟的两脚之间的那部分很短的电线)来要大得多。因此在这个分路(鸟的身体)里的电流就非常小，小到对鸟没有危害。可是停在电线上的鸟，如果翅膀、尾部或嘴触到电线杆——一般说不管用什么方式同地连接，那就马上会有电流通过它的身体流入地里，使它触电身死了。这种情形也常常可以看到。

鸟类有一种习惯，当它们停在高压电线杆的横臂上的时候，



图 247　为什么鸟能够平安无事地停在电线上

常常在有电流的电线上磨嘴。因为横臂没有绝缘，所以停在上面的鸟是和地面相接的。这样，鸟一触到有电流的电线，就不可避免地要触电身死了。这类事情发生得非常多。因此，譬如说在德国，甚至已经采取了特别的措施来防止鸟类的死亡。为了这个目的，他们在高压电线杆的横臂上装了绝缘的架子，使鸟类不但可以停在上面，并且让它们可以安全地在电线上磨嘴(图248)。也有的在危险的地方装着特别的装置，使鸟类碰不到它。



图 248　在高压电线杆的横臂上为鸟类装上了绝缘的架子

现在的高压电线网每年都有很大的发展，所以为了林业和农业的利益，也要保护飞禽，免得它们被电流杀死。

在闪电光下

在大雷雨的晚上，在电光的短促的一闪中，你也许看到过街道上一种别致的景致吧！设想你在一个古老的城市的大街上忽然遇到一场大雷雨。你在电光的一闪下，一定看到：刚才还是十分活跃的街道，在这一刹那间却好像是“冻结”了。马停留在跑步的姿势里，腿都悬空了；车同样也停着不动，车轮上的每一根辐条都可以看得清清楚楚……

这种好像静止的现象，原因是在闪电的持续时间非常短促。原来闪电也同所有的电火花一样，它的一闪的时间短到不能用普



通的方法来测量。可是利用间接的方法却可以查出，每次闪电持续的时间常常只有 1/1000 秒。[1] 在这样短的时间间隔里，物体的位置的移动是不容易被人眼察觉的。所以熙熙攘攘的街道，在闪电光下似乎变得完全不动，那是一点也不奇怪的：要知道我们在闪电光下能够看到物体的时间不到 1/1000 秒啊！在这样短的时间里，即使是迅速奔驰着的汽车，它的车轮上的每一根辐条也只能移动几万分之一毫米。这样的运动在人眼里当然跟静止没有分别。又因为印象留在视网膜上的时间要比闪电的持续时间长得多，因此这也增强了静止的印象。

闪电值多少钱

在从前人们把闪电当做神的时候，提出这样的问题会被认做是亵渎神的行为的。但是在科学发达的今天，电能已经变成了一种商品，它同一切别的商品一样，可以计量和估价；这时候提出闪电值多少钱的问题，当然不会被认为是毫无意义的。这个计算题的内容包括：计算出闪电放电的时候所消耗的电能，以及照电灯电的价格算出它值多少钱。

算法是这样：依据最新的资料，闪电放电的电压等于 5 000 万伏特。电流据估计大约是 20 万安培(顺便说一说，这数字是根据铁心被电流磁化的程度来确定的；电流是在打雷的时候通过避雷针来到线圈里的)。把伏特数和安培数相乘，就可以得到电功率的瓦特数了。不过这里应该考虑到，在放电时候电压会一直降

[1] 也有持续时间比较长的闪电，长到 1/100 秒或 1/10 秒，还有连续的闪电，几十道闪电在同一径迹上，一个接一个，这样的闪电持续时间更长——可以长到 1.5 秒。



落到零，所以计算闪电的电能得用平均的电压，换句话说，就是初压的一半。

所以我们的算式是：

$$电功率 = \frac{50000000 \times 200000}{2}$$
$$= 5000000000000瓦特$$
$$= 5000000000千瓦$$

得出来的数目里有这么多的零，你自然会认为闪电的价钱一定也是一个很大的数目。可是如果用电灯费通知单里所用的计电单位千瓦小时来表出这些电能，那得到的数目就要小得多。闪电的持续时间不会超过 1/1000 秒，在这一个时间里，消耗掉的电能不过是$\frac{5000000000}{3600000} \approx 1400$ 千瓦小时。1 千瓦小时为 1 度。如果按照每度电收 0.50 元这就不难算出闪电的价钱：

$$0.50 \times 1400 = 700(元)$$

所得的结果是惊人的：功率比重炮弹大 100 多倍的闪电，却只值 700 元。

有趣的是，现代的电工技术已经能够制造闪电了。但是这种人工制造的闪电跟自然界的闪电比较，还是小的。

屋子里的雷雨

你如果想在屋子里做一个小喷泉，那是很容易的。只须拿一根橡皮管，把它的一头浸在水桶里，放在高处，或是把橡皮管套在自来水龙头上。不过管的出口一定要很小，使喷泉的水分裂成许多股细流。为了这个目的，最简单的方法是把一根抽掉了铅心的铅笔杆插在橡皮管喷水的一头。如果要更方便，还可以在这一

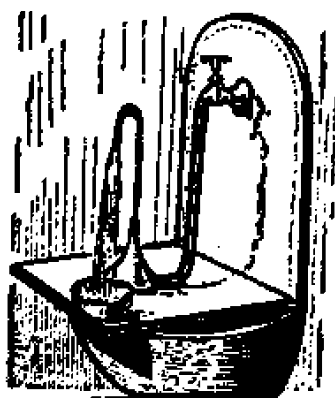


图 249　小型的雷雨

头套一个倒转的漏斗，像图 249 所画的那样。

使喷泉的高度达到半米，并且让水流笔直向上，把用绒布擦过的火漆棒或硬橡胶梳子移近喷泉。你立刻会看到一种相当奇怪的情景：喷泉的下降部分的那几股水，会合成一大股水。这股水落到放在下面的盘底上，会发出相当大的声音，和雷雨所特有的噪声一样。所以物理学家波艾斯关于这一点曾经说过这样一句话："雷雨里的雨滴会变得那样大，毫无疑问正是这个原因。"你如果把火漆棒移走——喷泉立刻就又变成许多股细流，而那个雷雨所特有的噪声，也变成细流的柔和声了。

在不知道内情的人的面前，你可以像魔术家使用"魔棒"那样，来使用这根火漆棒。

火漆棒对于喷泉的这种意外作用，可以这样来解释：原来水滴会因感应而生电，面向火漆棒那一部分水滴会因感应而生阳电，相反方面的那些水滴会生阴电。这样一来，水滴里电荷不同的部分靠近在一起，它们要互相吸引，就使水滴合并起来了。

电对水流的作用，你还可以用更简单的方法看到：你如果把一个刚梳过头发的硬橡胶梳子拿到自来水的一股细流附近，这时候水流会变得很密实，并且会明显地向梳子的方向弯过去，形成急剧的偏向(图 250)。解释这种现象比解释前一种要复杂些：它同在电荷作用下的表面张力的改变有关。

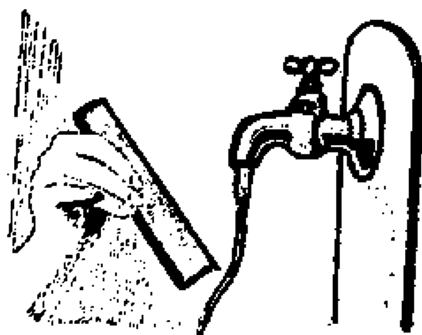


图 250　在带有电荷的梳子移近水流的时候，水流会朝着它弯过去

顺便让我说明一下，传动皮带在皮带盘上转动的时候所以会起



电，也可以用摩擦容易生电来解释。这样产生的电火花在某些生产部门里很有引起火灾的危险。避免的方法是在传动皮带上镀银：因为有了薄薄一层银以后，传动皮带就成了导体，于是电荷不能在上面积蓄起来了。



19 光的反射和折射、视觉

五像照片

摄影术里有一种方法，可以在一张照片上拍摄出一个人的几种不同的面相。在用这种摄影术拍摄成的图 251 里可以看到 5 种姿势。这种照片比普通照片好的地方，毫无疑问是它能把照片里的人的特点表现得更加完全。我们知道，摄影师最关心的是怎样使照片里的人的面相能最好地把特点表现出来。这里既然一次可以得到几种面相，那末要从里面挑出一种最能表现特点的来，当然可能性就更大些。

这样的照片是怎样拍的呢?当然，一定得靠镜子来帮忙。照相的人背朝着照相机 *A* 坐着，面朝着两面直立的平面镜 *CC*(图 252)。两面镜子所成的角度是 360 度的 1/5，也就是 72 度。这样的两面镜子应该可以反射出 4 个人像，它们各用一种姿势向着照相机。这些像加上照相机所摄的实物像，就成了一张五像照片。所用的平面镜应该没有框子，以免框子被照进在相片上。为了在镜子里不映出照相机，得在照相机前面设置两张幕 *BB*，幕的中间开个小缝，放置镜头。



图 251　在一张照片里，同一个人有 5 种不同的面相



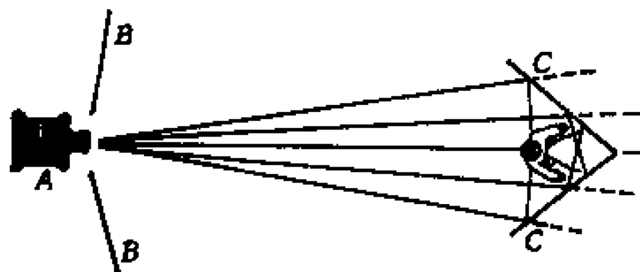


图 252　拍摄五像照片的方法。照相的人应该坐在两面镜子 CC 之间

照出的像的数目要看两面镜子所成的角度。角度越小，照出的像的数目越多。在角度等于$\frac{360°}{4}=90°$的时候可以得到 4 个像，在角度等于$\frac{360°}{6}=60°$的时候可以得到 6 个像，在角度等于$\frac{360°}{8}=45°$的时候可以得到 8 个像……不过反射的次数越多，像就越暗淡，所以普遍都限于拍摄 5 个像。

日光发动机和日光加热器

有一种极引人的想法，就是利用日光能来烧热蒸汽机的锅炉。让我们先来做一个不太复杂的计算。地球上每一平方厘米的表面，在大气界限以外受到太阳光线的直射，每分钟接受到的日光能，是能精确地测量出来的。这个数量显然是不变的，所以把它叫做“太阳常数”。太阳常数的数值，就整数来说，是每分钟每平方厘米约 8 焦耳。可是，太阳经常不断地给地球送来的这份热量，并不能完全到达地球表面：大约有半个小卡[1]要被大气吸收掉。直晒在日光下的地球表面，每平方厘米每分

〔1〕1 小卡 =4.18 焦，1 大卡 =4.18 千焦。全书同。

钟里接受的热量，可以算它 5.8 焦耳的热量。改用平方米来说，就是每分钟 58 000 焦耳，或每分钟 14 大卡，也就是每秒钟大约 1/4 焦耳。我们知道，4.18 千焦耳(1 大卡)的热完全变成机械工作的时候，可以产生 4184.6 焦耳(427 千克力米)[1] 的功。因此，竖直地射在 1 平方米地面上的日光，大约可以供给我们 980 焦耳每秒或略大于 980 瓦的能。

要太阳的辐射能完成这么多的功，必须在最有利的条件下——阳光得竖直地射在地面上，并且得 100% 变成功。可是目前已经实现了的那些直接利用日光能做动力的尝试，离这种理想的条件还很远。它们的效率都不超过 5% ~ 6% 。只是在最近才有几种最有效的日光发动机，效率达到了 15% 。

利用太阳的辐射能来做机械工作比较难，但是利用它来产生热却比较容易。如太阳能热水器，是目前使用最普遍和成效最好的一种太阳能装置，它可以为家庭、工厂或浴室、旅馆等公共场所提供洗澡、洗衣、炊事等用途的热水，水温在夏季一般能达到 50 ~ 60 摄氏度。这种装置构造简单，成本不高，在北纬 45 度到南纬 45 度之间的城乡地区最适用，因为这个地区里每年大约有 2000 小时以上的日照时间。现在全世界至少有几百万台太阳能热水器在工作。

还有利用太阳能来蒸煮食物的太阳灶，利用太阳能来干燥农副产品的太阳能干燥器，在广大农村地区，特别在燃料缺乏的地区，也很有发展前途。

在有些干旱的沿海或海岛地区和一些内陆咸水地区，还利用太阳能蒸馏器来制取淡水。

另外，在某些现代化的建筑设计中，正在考虑利用太阳能供建筑采暖或空气调节。

---

[1] 1 千克力米 =9.8 焦。





图 253　屋顶上的日光热水装置

隐身帽

从远古时代流传下来的故事里，有一个关于隐身帽的故事，说有一顶帽子，谁戴了它，别人就都看不见他。普希金在《鲁丝兰和留德米拉》里曾经生动地叙述了这个古代的传说，并且把隐身帽的奇妙的性能有趣地描写了一番。

> 于是留德米拉想了起来，
> 这时候她的心忐忑不安，
> 她试戴了赤尔诺魔的帽子……
> 把帽子转过去转过来，
> 她把帽子压在眉毛上，正着戴，歪着戴，
> 又把它颠倒过来戴。
> 看啊！真是千古奇事！
> 镜子里的留德米拉不见了；



把帽子倒回来，

从前的留德米拉又出现了；

再倒着戴——又不见了；

取下来——她又在镜子里了！

“好极啦！魔法师！我的天哪！

从今以后，我在这里不再有危险了……”

俘虏留德米拉的惟一护身术，就是她有隐身的能力。在可靠的隐身帽的掩护下，她避开了卫兵的监视。这个看不见的女俘虏在不在，卫兵们只能根据她的动作来推断。

随时随地可以看到

她的飘忽无定的踪迹：

有时候，金黄色的果实

在喧哗着的枝头上不见了，

有时候，一滴滴的泉水

落在揉皱了的草地上了。

这时候城堡里的人就知道

大概是这位公主在进饮食了……

夜幕还只刚刚揭开，

留德米拉就到瀑布里

去洗冷水澡。

有一天早晨，

卡尔本人就曾在宫里望见：

在看不见的手下面，

飞溅着瀑布的浪花。

古代人的动人的梦想，有许多早已变成现实了；不少神话里的魔术已经变成了科学上的财富。穿过高山，捕集闪电，坐着飞



行毡飞翔……

那末像隐身帽这种东西难道就不能发明吗?换句话说，我们就找不到使别人看不到自己的方法吗?现在就让我们来谈一谈这个问题。

隐 身 人

在《隐身人》这本小说里，英国作家威尔斯竭力使自己的读者相信隐身是完全能实现的。小说里的主人公(作者把他描写成了一位“世界上从来没有过的天才物理学家”)发明了一种方法，可以使人的身体变得看不见。下面是他对一位熟悉的医师所说的关于他的发明的根据。

“我们能够看见一件东西，是由于这件东西能对光线起作用。你知道，物体或者是吸收光线，或者是反射光线、折射光线。如果物体既不吸收光线，也不反射光线或是折射光线，那它就根本不能被看到。例如，你看得见那个不透明的红箱子，就因为红色的涂料能够吸收一部分光线，把其余的光线反射出去。假如那个箱子一点光线也不吸收，而是把全部光线都反射出去，那它在我们眼里就会是一个耀眼的白箱子，像银制的一样。能闪烁发光的箱子只能吸收很少的光线，它的表面上反射的光线一般也不多，只是在箱子上的某些地方，在箱棱上反射着和折射着光线，这样就使我们清楚地看到它的闪烁着反射光的外表——有点像发光的骨架。玻璃箱子发光比较少，在我们眼里它不像闪烁着光的箱子那样清楚，这是因为玻璃上反射的光线和折射的光线比较少。

如果把一块普通白玻璃放在水里，特别是如果把它放在某种比水密度更大的液体里，那就几乎会完全看不见它，因为透过水射到玻璃上的光线，受到折射和反射的程度非常小。玻璃已经变得跟飘在空气里的一股二氧化碳或氢气一样，看不见了。”

“是的，”坎普(医师)说，“这一切都极简单，在今天，每一个学生都知道。”

“可是还有一件事也是每一个学生都知道的。如果把一块玻璃捣碎成粉，在空气里它就变得十分容易看见了——它变成了不透明的白色粉末。为什么会这样呢?因为把玻璃捣碎，就是增加它的表面也就是使它所反射和折射的光线增多。玻璃片只有两个面，而玻璃粉末的每一颗粒都能反射和折射通过它的光线，所以能够透过它的光线就非常少。可是如果把捣碎了的白玻璃放在水里，它马上就会隐去。捣碎了的玻璃和水有几乎相同的折射率，这就使光线从水进入玻璃或从玻璃进入水的时候，发生极少的折射和反射。

“把玻璃放在任何一种折射率同它差不多的液体里，你就不能看到它：凡是透明的物体，只要把它放在折射率同它相同的介质里，就会变得看不见。懂得这一点以后，只要略微想一想就会相信，我们也能使玻璃在空气里变得看不见：设法把玻璃的折射率做得跟空气的折射率相同；因为这时候光从玻璃透到空气里，不再会被反射，更不会被折射。”[1]

“对，对，”坎普说，“但是要知道，人并不是玻璃啊。”

“不，人比玻璃更要透明。”

“胡说!”

“自然科学家也是这样说的!难道你只过了 10



年，就完全忘记了物理学吗？譬如纸是透明的纤维制成的，它所以会发白而不能透光，正同玻璃粉会发白而不能透光是同样的道理。但是如果你在白纸上涂上油，让它来填满纤维之间的空隙，使纸只能用表面来折射和反射光，那末这张纸就会变得同玻璃一样透明了。不但纸是这样，布的纤维，毛织物的纤维，木材的纤维，我们的骨骼、肌肉、毛发、指甲和神经都是这样！总之，人身上的一切，除了血里的血红素和头发里的黑色素以外，都是透明无色的组织组成的。所以要使我们彼此看不见是不很费事的！”

有一件事实也可以做这种见解的证据，就是身上没有毛、组织里缺乏色素的生着白化病的动物，是相当透明的。1934 年夏天，有一位动物学家在儿童村里找到一只缺乏色素的白蛙，曾经这样描写过它：“皮很薄，肌肉组织能透光；内部器官和骨骼等都

---

〔1〕如果把一个完全透明的物体用一种能够十分均匀地散射光线的墙围起来，我们就可以使这个物体完全看不见。这时候，你如果凑在旁边一个小洞上往里看，你的眼睛从这个物体所有各点上得到的光，会同这个物体完全不存在的时候得到的光一样多：没有任何闪光或阴影会暴露这个物体的存在。

这个试验的做法是这样：用白色厚纸片做一个直径半米的漏斗，把它放在离一个 25 瓦电灯泡有一些距离的地方，像图 254 那样。从漏斗下面插进一根玻璃棒，要尽可能把它插直。稍微歪一点就会使玻璃棒的中心轴显得比较黑，边缘显得比较亮，或者相反。这两种照明情况在玻璃棒略微变动一下位置的时候，就会从一种变成另一种。在试了许多次以后，才能使这根玻璃棒照明得十分均匀。这时候如果把眼睛凑在侧面一个不到 1 厘米宽的小孔往里看，就会完全看不见这根玻璃棒。在这种实验的条件下，虽然玻璃物体的折射能力同空气的折射能力有很大的差别，可是玻璃物体还是可以变得完全看不见。

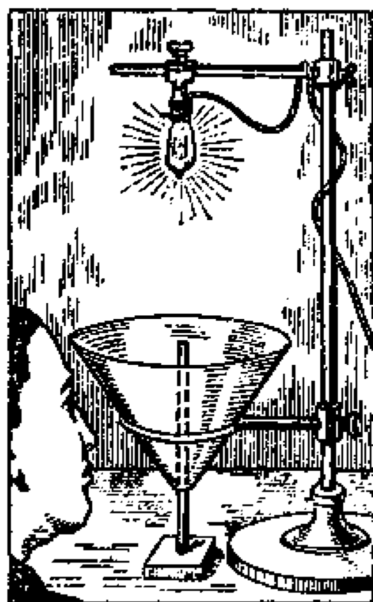


图 254　看不见的玻璃棒



能看到……透过腹壁能够非常清楚地看到这种缺乏色素的蛙的心脏的跳动和肠的蠕动。”

威尔斯小说里的主人公发明了一种方法，能把人体里的所有组织，甚至身体里的色素都变得透明。他成功地把这个发明应用在自己身上。试验获得了辉煌的成就——发明家本人完全变成了一个隐身人。

这个隐身人的以后情形，我们现在就来讲一讲。

隐身人的威力

小说《隐身人》的作者非常聪明而且彻底地证明了，一个人变得透明不能被人看见以后，他就因此取得了几乎是无限的威力。他能够进人任何一间屋子，毫无顾虑地拿走任何一件东西。人们看不见他，所以也捉不到他。由于自己的不能被人看见，他可以跟整队的武装军队斗争而得到胜利。隐身人可以用难以躲避的惩罚来威胁所有不能隐身的人，使全城的居民都服从他的命令。他本人不能被捉到不能被伤害，而他却有完全可能去伤害所有别的人。这些人无论怎样设法自卫，迟早总要被这个隐身的敌人追赶上而受到迫害。这种优越的地位，就使这本英国小说里的主人公可以向本城里受他威胁的人发出这样一道命令：

> 本城从今天起就不在女王的管辖下了。请你们告诉你们的团长、警察和所有的人：本城从此必须服从我的统治！今天是新世纪——隐身人世纪的第一年，第一天！我就是隐身人一世。一开始，我的统治是宽大的。在第一天，我只判一个人死刑，给大家做榜样。被判死刑的人名字叫坎普。今天就是他的死期。尽管他闭门不出尽



力躲藏起来，尽管他用卫兵保护或是穿上盔甲，可是死，不可见的死，还是会临到他身上的！虽然他采取了预防的措施，但是我的人民不会不知道，死神一定会降临到他身上的！我的臣民们，千万别帮助他，以免同归于尽。

开始的时候，隐身人是胜利的。后来，受威胁的居民作了极大的努力，才找到了跟这个梦想做皇帝的隐身敌人周旋的方法。

透明的标本

这本幻想小说所根据的物理学推理是不是可靠呢？完全可靠。任何透明的物体，放在透明的介质里，只要它们的折射率相差小于0.05，这个透明物体就会变得看不见。在《隐身人》这本小说写成以后10年，人们也真做成了一部分身体的透明标本，甚至整个死动物的透明标本。这些标本现在可以在许多博物馆里看到。

透明标本的制法，简单地说，是先使标本经过一定的加工手续——漂白和洗净，然后再把它浸在水杨酸甲酯里(这是一种有强烈折射作用的无色液体)。最后把用这种方法制得的老鼠、鱼等标本，浸在装满同样液体的容器里。

这里当然不必把标本做得完全透明，因为在完全透明的情况下，这些标本就会完全看不见，因而对于解剖没有用处。但是如果愿意，也可以把它们做得完全透明。

当然，从这里到威尔斯理想的实现——把活人做得透明到完全看不见——还距离很远。因为首先得找到方法，把活人的



身体浸在有透明作用的液体里，而又能够不伤害他的组织机能。第二，制成的标本还只是透明的，而不是看不见的。这样的标本只有浸在有同一折射率的液体里，它的组织才看不见。若是让它们留在空气里，那末只有在它们的折射率等于空气的折射率的时候，才能够变得看不见。但是，怎样才能做到这一点，我们还不知道。

可是就算有这么一天，上面所说的两件事都做到了，也就是英国小说家的幻想变成事实了，那时候我们会不会就有一些隐身战士、隐身队伍，能够意外地出现在敌人后方，用自己那种不可思议的、超自然的行动使整队敌军惊惶失措呢？

小说里的一切，作者预先都作了周密的考虑，所以你会不由自主地信服他所写的事实，认为隐身人真是人类里面最有威力的人……可是事实并不如此。

原来《隐身人》这本小说的聪明的作者忽视了一个很小的情况。这一点，留在下一节里讲。

隐身人能看见别人吗

假如威尔斯在下笔以前曾经向自己提出过这个问题，《隐身人》那本不可思议的小说也许就会写不成功……

事实上，就是这一点破坏了对威力强大的隐身人的幻想。隐身人应该是一个瞎子。

为什么小说里的主人公能叫别人看不见他呢？这是由于他的身体各部，包括眼睛在内，都已经变得透明了，因而它们的折射率也等于空气的折射率。

让我们想一下，眼睛的作用是什么。眼睛里的晶状体、玻璃体和其他部分都会这样折射光线，使外面物体的像能够出现在视



网膜上。可是如果眼睛和空气的折射率相同，那就不再发生折射现象了：因为从一种介质进入另一种折射率相同的介质，光线不会改变方向，因此也就不能会聚在一点上。光线在完全没有阻碍的情况下进入隐身人的眼睛里，它既不会折射，也不能留在眼睛里(因为隐身人的眼睛里没有色素)，[1] 因此隐身人不能在自己的视觉里留下任何的像。

由此可知，隐身人是什么也看不见的。他的全部优点显然对他没有一点好处。这个可怕的想做皇帝的人只能流浪在街头，求人家布施；可是人们又没有办法帮助他，因为谁都看不见这个求乞的人。这个最有威力的人实际上只是一个束手无策、陷入惨境的残废人[2]……

因此，按照威尔斯所指的方法去寻找“隐身帽”，是没有用的；即使照这个方法去做一切都顺利，也不能达到目的。

保护色

可是也有别的方法可以解决隐身帽的问题，就是把物体涂上适当的颜色，使眼睛看不见它。这个方法在自然界是经常使用的：这就是生物的保护色。自然界里有许多生物就是靠保护色避

〔1〕为了使动物得到不论什么样的感觉，光线在进入它的眼睛的时候，应该发生某些哪怕是极小的变动，也就是说，应该完成一定的工作。为了这个，应该至少有一部分光线被眼睛留住。可是完全透明的眼睛当然是不能留住光线的——否则它就不能算是透明的了。凡是用身体透明这个特点来自卫的动物，它们的眼睛——如果它们有眼睛的话——都不是完全透明的。著名的海洋学家牟莱说道：“天然生长在海底下的大多数动物都是透明无色的。在用网把它们捞起来了以后，我们只能从黑色的小眼睛认出它们来，因为它们的血缺乏血红素，并且是完全透明的。”

〔2〕可能是小说的作者有意留下这一个重大的漏洞的。大家知道，威尔斯常常是用文艺作品的写法来写自己的幻想小说的：他用大量的真实细节来掩盖幻想小说里的根本缺陷。在这本幻想小说的美国版里，作者在序里率直地透露了这一点。

过敌人，在生存竞争当中保存自己的。

战士们所说的“自卫色”，动物学家从达尔文的时候起就把它叫做“保护色”或“掩护色”。这种保护色的例子在动物界可以举出几千个来，我们简直每走一步路都可以遇见它。沙漠里的动物，大多数都有微黄的“沙漠色”作为它们的特征。那里的狮子、鸟、蜥蜴、蜘蛛、蠕虫等等，总之是沙漠动物群当中一切具有代表性的动物身上，都可以找到这种颜色。相反的，北方雪地上的所有动物，可怕的北极熊也好，不伤人的海燕也好，却都披上了一层白色，它们在雪的背景上简直看不出来。还有生活在树皮上的蝶蛾和毛虫，颜色都非常接近树皮的颜色(如毒蛾等)。

每一个捕捉昆虫的人都知道，由于昆虫有保护色，要找到它们十分困难。你不妨试着去捉在你脚边的草地上吱吱叫着的绿色蚱蜢——在掩护着它的绿色背景里，你简直看不清蚱蜢在哪里。

水生动物也是这样。在褐色藻类里生活的海生动物，都有“保护性”的褐色，使眼睛无法察觉它们。生长在红色海藻区域里的动物，主要的保护色是红色。银色的鱼鳞也同样具有保护性，它保护鱼类，既使它们受不到在空中搜寻它们的猛禽的伤害，又使它们受不到在水下威胁它们的大鱼的袭击：水面不但从上面往下看像面镜子，并且从下面，从水的最深处向上看更像面镜子(“全反射”)，而银色的鱼鳞刚好同这种发亮的银色背景融合成一片。至于水母和水里的其他透明动物，像蠕虫、虾类、软体动物等，它们的保护色是完全无色和透明，使敌人在那无色透明的自然环境里看不见它们。

自然界在这一方面所用的“妙计”，真比人类的发明才能高明得多。许多动物都能按照周围条件的变动来改变保护色的色调。在雪的背景上不易察觉的银鼠如果不随着雪的融化而改变自己毛皮的颜色，那它就会失去保护色的好处。因此在春天，这种白色小动物会换上一身红褐色的新毛皮，使自己的颜色跟那新从雪里裸露出来的土壤的颜色打成一片。随着冬季的来临，它们又



穿上了雪白的冬衣，重新变成白色。

自 卫 色

人类从自然界那里学会了这种有用的艺术，使自己的身体同周围的背景相融合，以免被敌人发现。从前曾经点缀过战场的那些杂色斑斓的军装，现在已经变成过去了：代替它们的是具有保护作用的常见的单色军装。现代兵舰的灰色的钢甲也是一种自卫色，它使兵舰在海洋的背景上很难被分辨出来。

有一种所谓“战术的伪装”，也同这自卫色有关。防御工事、大炮、坦克、兵舰等都要伪装起来，或者用人造雾掩蔽起来，以迷惑敌人的视线。兵营要用特殊的网来隐蔽，网眼里还要编上一簇簇的草，战士也要穿上染成草绿色的衣服。

现代的军用飞机也广泛地使用着自卫色和伪装。

涂着褐色、暗绿色和紫色(使自己的颜色同地面的颜色相配合)的飞机同地面上的背景，是很难被飞在高处的飞机分清的。

飞机的底部，为了迷惑地面上的观察者的视线，得漆成跟天空一致的浅蓝色、浅玫瑰色和白色。这种颜色像小斑点一样漆在飞机的表面上。在 740 米的高空，这些颜色会同那不显眼的一般背景融合成一体。在 3 000 米的高空，有这种伪装的飞机会变得看不见。在黑夜袭击用的轰炸机应当漆成黑色。

在所有的环境里都适用的自卫色，是一种能够反射四周景色的镜面。有这种表面的物体，能够自动地取得四周的颜色，几乎使人不能从远处发现它们的存在。在第一次世界大战的时候，德国人曾经在齐伯林飞艇上使用过这种方法。许多齐伯林飞艇的表面都是发光的铝，能够反射天空和云彩。假使不是它们的发动机的声音，要在它们飞行的时候发现它们，是很困难的。



所以，在民间故事里流传的关于“隐身帽”的幻想，在自然界和军事技术上都已经变成现实了。

人的眼睛在水底下

设想你能在水里潜伏无论多久，同时还能睁开眼睛。请问这时候你在那里能看见东西吗?

看来好像只要水是透明的，在水里看东西就应该和在空气里一样清楚。可是，我们可以回想一下上面所说的隐身人，他所以看不见东西，是因为他眼睛的折射率和空气的折射率相同。我们在水里的时候，所有的条件同威尔斯的隐身人在空气里的条件是接近的。看一下数字就更清楚了。水的折射率是 1.34，而人眼里各种透明物质的折射率是：

角膜和玻璃体……………………………………………1.34
晶状体……………………………………………………1.43
水状液……………………………………………………1.34

可以看出，晶状体的折射率只比水大 1/10，而我们眼睛的其他部分的折射率都和水相等。所以在水里，光线在人的眼睛里所形成的焦点是在视网膜的后面很远，因而在视网膜上所显现的物像就一定很模糊，使人很难看清要看的东西。只有非常近视的人才能在水底下比较正常地看到东西。

如果你希望想象一下在水底下看到的东西是什么样子的，那你可以戴上一副度数很大的近视眼镜(双凹透镜)。这时候，被折射到眼睛里来的光线，在视网膜的后面很远的地方形成焦点，结果你看周围就会出现一片模糊。



那末，人能不能靠折光很强的眼镜的帮助，在水底下看到东西呢?

眼镜上所用的普通玻璃，在这里不大适用：普通玻璃的折射率是1.5，也就是只比水的折射率(1.34)大一些，这样的眼镜在水里的折射光线的能力非常弱。一定要使用折光能力极强的特种玻璃(折射率差不多等于2的所谓铅玻璃)。戴着这样的眼镜，我们就能大致清楚地在水里看到东西(关于潜水用的特制眼镜，请看下节)。

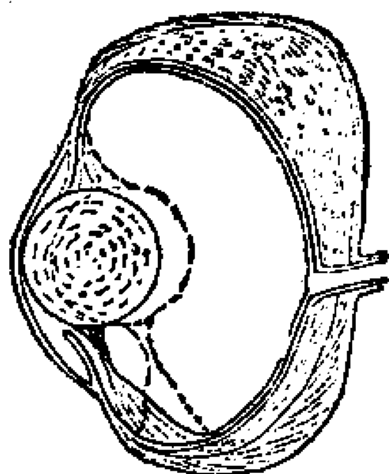


图255　鱼眼的断面图
它有球形的晶状体，在对光的时候并不改变形状，而只是改变它的位置，像图上虚线所表示的那样

现在可以明白，鱼的晶状体为什么会特别的凸出了。鱼有球形的晶状体(图255)，它的折射率在我们所知道的一切动物的眼睛当中是最大的。不然的话，这些生活在折光能力很强的透明环境里的鱼类，就差不多等于没有眼睛。

潜水员是怎样看东西的

有些读者一定会问，如果我们的眼睛在水里几乎不能折射光线，那末穿着潜水服工作的潜水员又是怎样在水底下看东西的呢?要知道潜水员所戴的面具常常是装着平玻璃，而不是装着凸玻璃的。还有，儒勒·凡尔纳的“鹦鹉贝”号里的几位乘客们，能不能透过潜水艇的窗子观赏一下水下世界的风景呢?

放在我们面前的是个新问题，但是也并不难回答。要回答这问题，先要注意：我们没有穿着潜水服到水底下的时候，水

是直接同我们眼睛接触的；戴了潜水面具(或者坐在“鹦鹉贝”号的船舱里)，眼睛和水之间就隔了一层空气(还有玻璃)。这就在本质上改变了整个情况。从水里来的透过玻璃的光线，先要遇到空气，通过空气以后才进入眼睛。从水里用任何角度射到一块平玻璃上的光线，按照光学原理，在走出玻璃的时候并不改变方向。可是以后从空气进入眼睛的时候，光线当然又会折射。在这种条件下，眼睛所起的作用，同在陆地上完全一样。要解答这个使我们觉得迷惑的问题，关键就在这里。我们可以十分清楚地看见养鱼缸里的游鱼，就是这一点的极好的说明。

透镜在水底下

把双凸透镜(放大镜)浸在水里，然后隔着它看水里的物体，这个简单的实验你做过没有?在做的时候你一定会吃惊：放大镜在水里几乎不起放大作用了!你也可以把一块“缩小”镜(双凹透镜)放在水里，这时候它好像也几乎失掉了缩小的能力。如果你用来做实验的不是水，而是一种折射率比玻璃大的液体，那末双凸透镜反而会缩小物体，双凹透镜反而会放大物体。

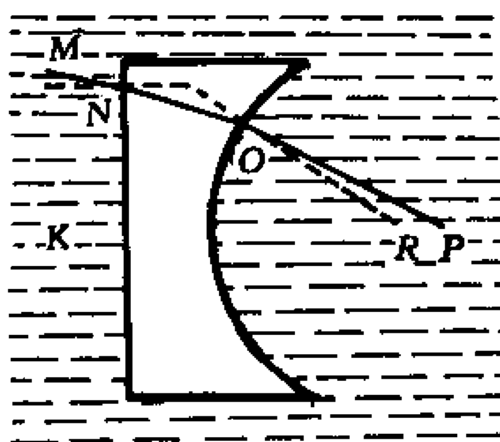


图256　潜水员用的眼镜是空心的平凹透镜。光线 *MN* 折射以后，就沿着 *MNOP* 这条路线行进，在透镜里面，它远离法线，在透镜外面，它靠近法线(也就是靠近 *OR*)。因此这种透镜起着会聚透镜的作用

可是如果你回想一下光线折射的原理，那你就不会对这些现象而吃惊了。双凸透镜在空气里能够放大，是因为玻璃



的折射率比周围空气的折射率大。然而玻璃和水的折射率相差不多：所以如果你把玻璃透镜放在水里，光线从水里进入玻璃的时候，就不会偏折得很利害。由于这个缘故，放大透镜到了水里，它的放大能力就要比它在空气里的时候小得多，而缩小透镜的缩小能力同样也要小得多。

有一些液体，折射率比玻璃大，所以“放大”镜在这种液体里会缩小物体，“缩小”镜会放大物体。空心透镜(说得正确些就是空气透镜)在水里也起着同样的作用：凹的会放大，凸的会缩小。潜水员用的眼镜正是这种空心透镜(图 256)。

没有经验的游泳者

没有经验的游泳者常常由于只是忘记了光线折射原理所引起的一种奇异的后果，而遭到很大的危险：他们不懂得，折射会把一切浸在水里的物体提得好像比它真正的位置高。池塘、河流以及每一个蓄水池的底部，在人的眼睛看来都差不多比它的真正深度浅了 1/3。人们如果把这种假相当做真相的话，往往就会陷入危险。关于这一点，儿童和一切身材不高的人特别应当知道，因为他们把水的深度估计错了，就更有发生生命危险的可能。



图 257　一半浸在水里的茶匙，看上去好像是折断了一样

原因就在于光线会折射。这种底部看来似乎是升高了的现象，同一半浸在水里的茶匙看上去好像是折断了的现象(图 257)，可以用同一个光学定律来解释。

你可以就在自己的桌子上检验这种

现象。



图 258　盆子和钱币的实验

让同学们这样围着桌子坐下，使他们看不见放在他们面前的一个盆子的底。在盆底上放一个钱币，这个钱币因为有盆壁挡着，大家当然也不能看到(图 258)。现在请你的同学们别转动头，定睛看你向盆里注水。这时候就会发生一件出乎意料的事情：你的同学们忽然都看到了钱币！把盆里的水汲掉以后，盆底和钱币重新又下沉了。

图 259 说明这是怎么一回事。盆底上 m 这块地方，在观察者(他的眼睛在水上面的 A 点)看来，位置好像是升高了：光线受到折射以后，从水里进入空气的光线会像图上所指的路线进入眼睛，而眼睛却在这些线的延长部分上，也就是在 m 的上面看到这部分的盆底。光线的进路越斜，m 的位置就越高。这就是为什么我们从小船上看平坦的池底的时候，常常会觉得直接在我们下面的那一部分池底最深，而四周就越远越浅。

所以池底在我们看来似乎是凹形的。反过来，我们如果能

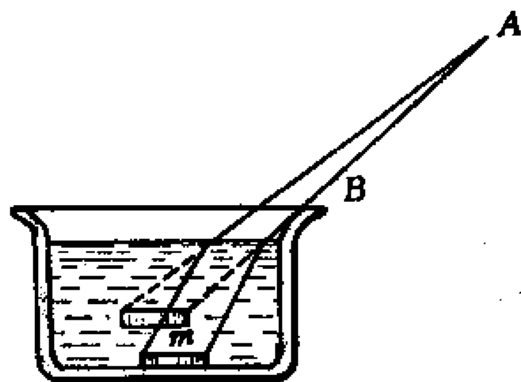


图 259　为什么在图 258 里钱币好像是升高了

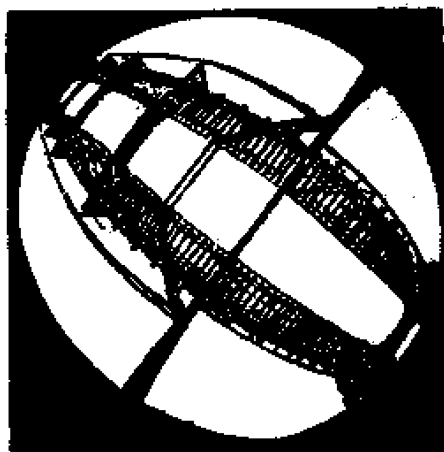


图 260　一座横跨河面的铁路桥，在水底下的人看来，是这样的



够从池底来看跨在池面上的桥，那我们就会以为它是凸形的(像图 260 那样；至于摄成这张照片的方法，我们以后再讲)。在这里，光线是从折射率比较小的介质(空气)走进折射率比较大的介质(水)，所以得到的效果就和光线从水进入空气的时候相反。由于同样的原因，站在养鱼缸前面的一排人，在鱼看来也应当不是笔直的一排，而是成弧形的，这个弧形的凸处向着鱼。至于鱼到底是怎样看东西的，或者说得更准确一些，鱼如果有人的眼睛，它们应当怎样看东西，这我们在后面再谈。

看不见的别针

把一个别针插在一块平的圆形软木上，然后把别针向下让软木浮在水盆里。假定这块软木不太大，而别针又有足够长，使软木不能遮住你的视线(图 261)，可是你无论怎样斜着头看，总不能看到别针。

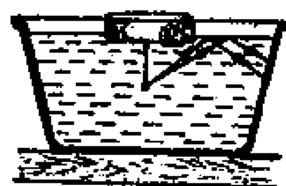


图 261　在水里的这个别针为什么会看不见

为什么从别针上来的光线不能到达

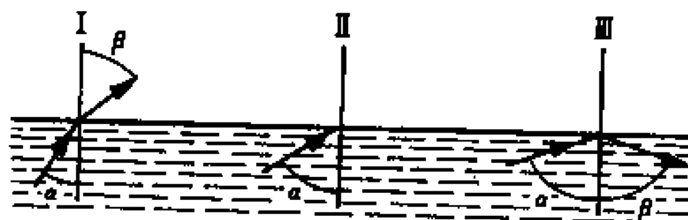


图 262　从水进入空气的光线受到折射时候的各种情况
在图 II 里，光线和水面相遇的时候跟法线所成的角度等于临界角，光线从水里出来后，就沿着水面滑去
图 III 所示的是全反射的情况

你的眼睛里呢?这是因为它们发生了物理学上所谓的“全反射”。

让我们来看这种现象是怎样形成的。

在图 262 里，我们可以看出光线从水进入空气(总之是从折射率比较大的介质进入折射率比较小的介质)的路线，以及跟这相反的路线。在光线从空气进入水的时候，它们会靠近那条法线；举例来说，依着跟法线成角度 β 的路线射入水里的光线，射进水里以后，就要依着比 β 角小的角度 α 的方向前进(如图 262 I，不过现在箭头所指的方向应该颠倒一下)。

可是在射来的光线掠过水面，几乎是跟法线成直角的方向射在水面上的时候，又该是怎样呢?它射入水里的路线跟法线所成的角度一定比直角小，是等于 48.5°。射入水里的光线是不能依着跟法线成大于 48.5°角的方向前进的。这个角对水来说就是临界角。你们以后如果想明白折射原理的许多出乎意料而又非常有趣的后果，就必须先把这个简单关系弄清楚。

现在我们已经知道，光线在一切可能的角度里射入水里的时候，到了水面以下都要挤在一个相当窄的圆锥体里，这个圆锥体的顶角是 48.5 + 48.5 = 97°。现在，我们来看光线取相反方向——从水进入空气——的时候，路线是怎样的(图 263)。按照光学定律，它们的路线跟上面说的完全相同。包含在上面说的

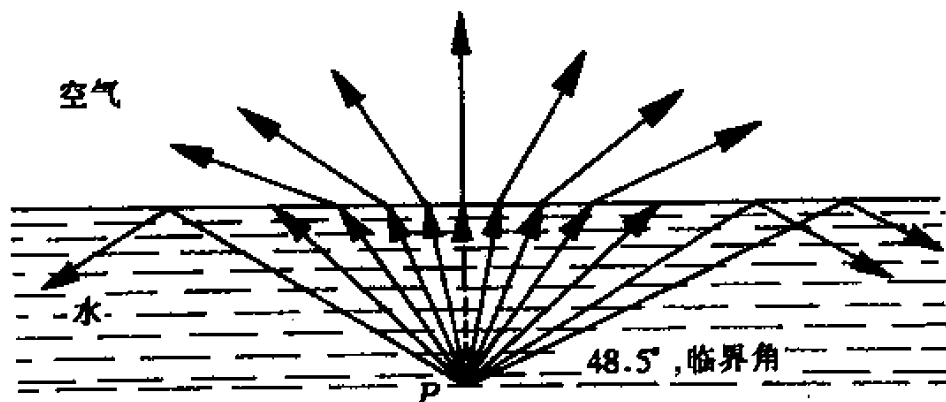


图 263　从 P 点用跟法线成大于临界角(对水来说是 48.5°)的角度射出的光线，是不能从水进入空气的，而要完全被反射回来



97°的圆锥体里的一切光线，在进入空气的时候，就要沿着水面以上整个180°空间，依各种不同的角度散开。

那末，那些落在上面说的圆锥体以外的水底下的光线，都到哪里去了呢?原来它们都走不出水面，水面就像镜子一样，把它们全都反射回去了。一般说来，任何一条水底下的光线，如果依着比临界角(也就是48.5°)大的角和水面相遇，都不会被折射而要被反射。它们要像物理学家所说的那样“全反射”[1]。

假如鱼类能够研究物理学的话，光学里对它们说来最重要的一章应该是“全反射”，因为这种现象在它们的水底下的视觉里起着最重要的作用。

许多种鱼都有银白的颜色，这极可能跟水底下视觉的特点有关。按照动物学家的意见，这样的颜色就是鱼类适应盖在它们上面的水面颜色的结果：前面已经说过，在从下往上看的时候，水面由于“全反射”，很像一面镜子。在这样的背景前面，只有银白色的鱼才不容易被它们水里的敌人发现。

从水底下看世界

许多人都想不到，如果我们从水底下来看世界，世界会是怎样不平凡：它在观察者的眼里会变得差不多不能被认出来了。

设想你是在水底下，抬着头在看水面上的世界。那些在你头顶上浮着的云是一点也不会改变形状的：因为竖直的光线是不会折射的。可是所有其他物体，只要它们射出的光线成锐角地和水

〔1〕在这种情况下的反射所以叫做全反射，是因为在这里射来的光线全都会被反射回来，而反射镜，即使是最好的镜子(用磨光的镁或银制的)，也只能反射出射到上面的一部分光线，而吸收了其余部分。所以水在上面说的条件下，可以说是理想的镜子。

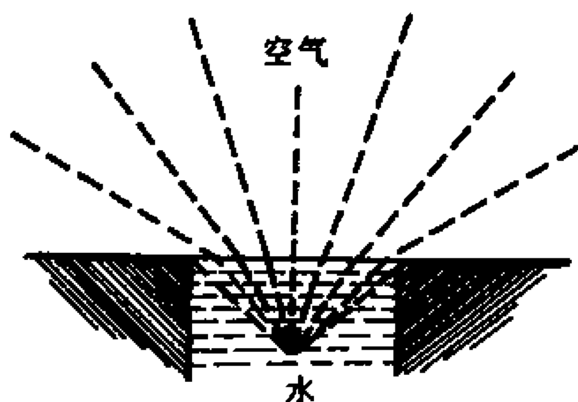


图 264　从水里向上看，外面世界都被压缩在一个顶角等于 97°的圆锥体里

面相遇，它们的形象就会被歪曲：它们好像位置越低的被压缩得越紧——光线和水面相遇所成的角度越小，挤得越利害。这也是可以理解的：水面上所见的世界既然全部都应该容纳在那个狭小的水底下的圆

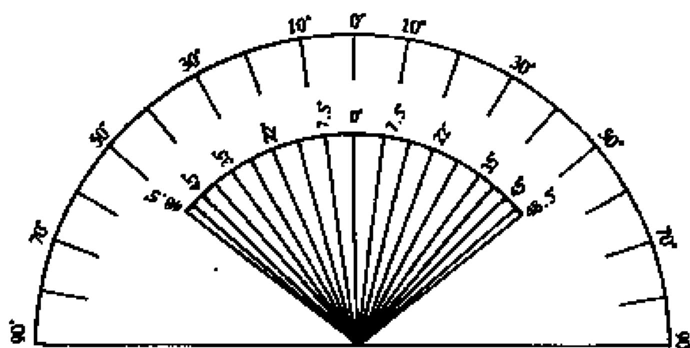


图 265　对图 264 的进一步解释：水外世界的 180° 弧，从水里看出来，缩成 97° 的弧了；弧上部分离天顶 (0°) 越远，压缩得越利害

锥体里，一条 180°的弧既然应该缩短到差不多一半，弯成一条 97°的弧，那末形象也就自然要被歪曲了。从物体射出的光线如果用 10°左右的角和水面相遇，物体在水里的像会被压缩得几乎认不出来了。可是最使你吃惊的是水面本身的形状：从水底下往上看的时候，它们完全不是平的，而是一个圆锥形! 在你看起来，你是站在一个大漏斗的底部，而漏斗的壁是用比直角稍微大一些的角度(97°)彼此倾斜着的。这个圆锥体的上部边缘围着由红、黄、绿、蓝、紫等颜色组成的彩色圈。为什么会这样呢? 白色的阳光是由各种颜色光组成的，每一种颜色光都有自己的折射率，因此也就有自己的“临界角”。就是因为这个缘故，从



水底下往上观察的时候，物体也好像是围着彩虹的光圈了。

那末在这个包含着整个水面上世界的圆锥体的边缘以外，还可以看到些什么呢？那里展开着一片发光的水面，它像镜子一样，会反映水底下的各种物体。

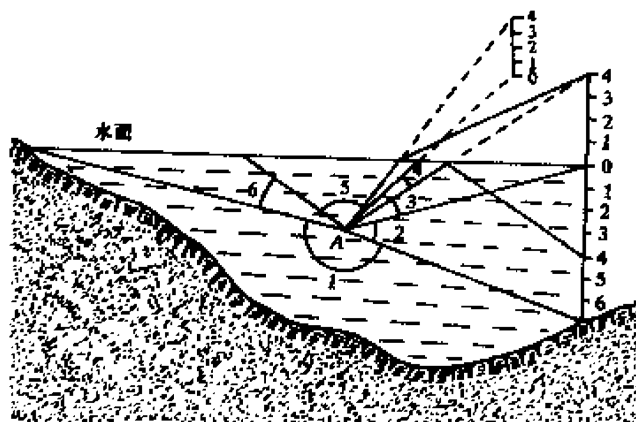


图 266　眼睛在 A 点的水底下的观察者所看到的一根半沉在水里的标杆。在视野 2 里可以模糊不清地看到标杆浸在水里的部分。在视野 3 里，可以看到这部分标杆在水面上的反映像。在还要高的地方，可以看到露在水面上的标杆，但是它被压缩了，并且同水面下部分隔得很远。在视野 4 里，可以看到河底的反映像。在视野 5里，可以看到成锥形的全部水面上世界。在视野 6 里，可以看到河底的反映像。在视野 1 里，可以看到河底的不清楚的像

对水底下的观察者说来，形状最特别的是部分浸在水里部分露在水面上的物体。让我们在河里插一根量水深浅的标杆(图 266)。这时候，眼睛在水底下 A 点的观察者会看到些什么呢？我们现在把四周能被他看到的地方——360°——分成几个区，然后对每一个区分别进行研究。在视野 1 的界限里，如果河底的亮度足够的话，他能看到河底。在视野 2 里，他能毫不歪曲地看到标杆的在水面下的部分。在视野 3 里，他大约会看到标杆的同一部分的反映像，也就是标杆的浸在水里部分的倒影(请记住，这里所说的是“全反射”)。再高些，水底下的观察者会看见标杆的在水面上的部分——但是它并不和水底下的部分相连接，而是移到高得多的位置上，跟下面的部分完全脱离开。不用说，观察者一定想不到这个悬在空中的标杆就是原在那段标杆的延长部分！这一部分的标杆显然已经大大地被压缩了，特别是它的下面一部分——那里的几条刻度线显然已经十分接近了。

河岸上被洪水淹没了一半的大树，从水底下看的时候，就应该像图 267 里所画的那种样子。



图 267　一半淹没了的大树，从水里看出来是这样的（请和图 266 对照着看）

如果在竖标杆的地方立着一个人，那末从水里看出来，这个人的形状会跟图 268 里所画的一样。下水洗澡的人，在鱼的眼睛里就应当是这种样子的！在鱼看来，在浅滩上行走的人是被分成了两截的，变成了两个动物：上一截没有脚，下一截没有头，却有 4 只脚！当我们从水底下的观察者（鱼）的旁边走开的时候，我们的上半部分身体就会越下越缩短。等我们走了一段距离以后，几乎全部水面上的身体都会消失——只剩下一个空悬着的人头……

这些不寻常的结论，我们能不能直接用实验来印证一下呢？可惜到了水里以后，即使我们能在水里睁开眼睛，也看不到很多东西。首先，我们在水里只能够逗留几秒钟，而在这些时间里水面是来不及恢复平静的；要透过动荡的水面来看清物体，当然是困难的。第二，前面已经讲过，水的折射率跟我们眼睛的透明部分的折射率很少分别，因此在视网膜上出现的物像极不清楚，周围的一切看上去都会模糊不清。从潜水钟、潜水帽或是从潜水艇的玻璃窗里向外看，也是不

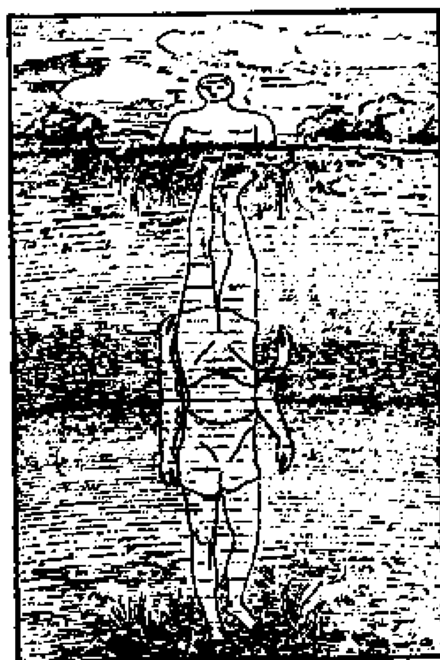


图 268　一个齐胸浸在水里洗澡的人，从水里看出来是这样的（请和图 266 对照着看）



能看到所要看的东西的。

在这些情况下，我们已经讲过，观察者虽然是在水底下，却跟“水下观察”的情况不一样：因为在这些情况下，光线在进入我们眼睛以前，先要穿过玻璃再到空气里，因此，它就要受到相反的折射。受到相反的折射以后，光线或是恢复了原来的方向，或是取得了新的方向，但是总不会保留住它在水里所取的方向的。这就是为什么从水下室的玻璃窗向外看，也不能得到“水下观察”的正确概念。

不过我们没有必要亲身去水底下，从水里看水面上的世界。可以利用一种内部装满水的特别照相机来研究“水下观察”。这种照相机不用镜头，代替它的是一种中间钻着小孔的金属片。

很容易明白，假如光孔和感光底片之间的全部空间都装满水，那末外面世界映在底片上的像，就应当跟水底下的观察者所看到的像一样。用这种方法可以得到极有趣的照片，图260就是这样得到的照片之一。至于水底下的观察者眼里所看到的水面上的物体，形状所以会那样歪曲（例如直的铁路桥在照片上变成了弧形），我们在讲到池的平底为什么看上去好像是凹形的时候，已经讲过了。

还有一种方法可以直接看到水底下的观察者眼里的水面上世界：可以把一面镜子沉在一池平静的水里，适当地使镜子倾斜，就可以在里面看到水面上物体的反映像。

利用这些观察法得到的结果，在一切细节方面，都可以证明上面那些理论上的见解是正确的。

由此可见，水里的眼睛和水外的物体之间的那一层透明的水，能够歪曲水面上世界的整个景象，给了它一种奇异的轮廓。陆栖动物来到水底下以后，一定会不认识它原来住过的那个世界——从透明的水乡深处向上看的时候，这个世界已经大大地改变样子了。

深水里的颜色

美国生物学家毕布曾经非常生动地描写过水底下的颜色的变化。

> 我们坐着潜水球沉到了水里，这时候，我们出乎意料地突然从一个金黄色的世界来到了一个碧绿的世界。在泡沫和浪花离开了窗子以后，我们的四周满是一片绿光。人脸、瓶罐，甚至那黑色的墙壁也都染上了绿色。可是在甲板上人的眼里，我们是沉入了一片幽暗的青莲色的水里。
>
> 从一沉到水里起，我们的眼睛就无缘再见到光谱上的暖色[1]光线(就是红色和橙色的光线)了。在这里，红色和橙色好像是任何时候都没有存在过。但是不久，黄色也被绿色吸收掉了。那些可爱的暖色光线，虽然只占可见光谱的一小部分，可是当它们在30多米的深处消失了以后，剩下来的就只有寒冷、黑暗和死亡了。
>
> 随着我们往下沉，碧绿的颜色也渐渐消失；到了60米的深处，已经很难说水的颜色是绿中带蓝或是蓝中带绿了。
>
> 在180米的深处，周围的一切好像都染上了一种发光的深蓝色。在这种光线里，照明度已经变得这样小，连读书写字都成了不可能。
>
> 在300米的深处，我曾经试着判断水的颜色——是

〔1〕这里的“暖”字，是画家用来表示颜色的色彩的；“暖色”是指红色和橙色，跟这相对的是“冷色”，指蓝色和青色。

黑蓝色，还是深的灰蓝色?奇怪的是蓝色消失了以后，代替它的并不是可见光谱里的次一种颜色——紫色。紫色好像已经被吸收掉了。最后的一些近似蓝色的颜色，终于变成了不可捉摸的灰色。而灰色后来也让位给了黑色。从这一个深度起，太阳完全被战败了，光也永远被驱逐出去了。在人类带着电光来到这里以前的20亿年当中，这里曾经是一片绝对的黑色。

这位探险家在另一段里，对水底下极深处的黑暗又作了这样的描写：

水底下750米深处的黑暗，可以说比想象的还要黑——可是现在(在将近1 000米的深处)，四周显然黑得不能再黑了。看来，水面上的世界里的深夜，只能算是这里的黄昏。对“黑”这个字的使用，我从来不能像在这里一样，具有这样坚定的信心。

我们眼睛里的盲点

假如对你说，在你的视野里有一块地方，虽然它就在你的正前面，你却一点也不能看到它，这你当然是不会相信的。我们的视觉器官有这样大的缺点，而我们却一辈子也觉察不出来，这是可能的吗?可是做一个简单的试验,就能使你深信这一点了。

把图269放在离你右眼(闭上左眼)大约20厘米的地方，用右眼看那图上左方的一叉；慢慢地把这个图移近你的眼睛。这样，在移到一定距离的时候，图上右方那个在两个圆的交叉处的大黑点，就会完全消失!这个点虽然还在可见区域的范围里，

你却不能看见它了，而黑点左右两个圆圈你却仍旧看得很清楚!

这个试验是马里奥特在1668年首先提出的，不过形式略微

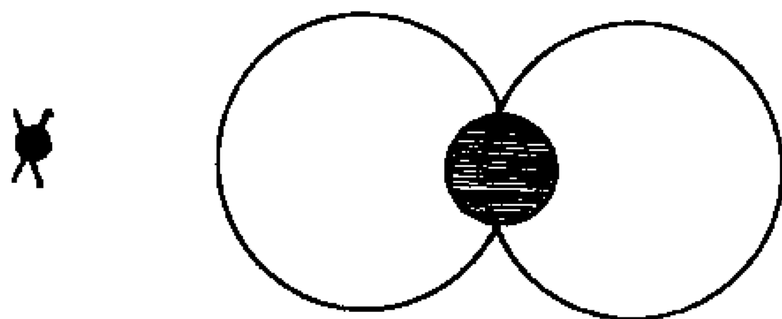


图269　一张能够帮助我们发现盲点的图

有些不同。马里奥特叫两个人彼此相隔2米对面站着，都用一只眼睛看旁边的某一点——这时候他们两人就都会发现对方没有了头。这个试验曾经使路易十四的大臣们非常高兴。

说也奇怪，人们直到17世纪才知道人眼的视网膜上有个盲点，以前谁也没有想到过有这样一个东西。视网膜上这个盲点的位置，就在视神经已经进入了眼球却还没有分成含有感光细胞的细支的地方。

我们不能察觉出视野里的这样一个黑点，是由于长时期来我们对它习惯了。我们的想象力会不知不觉地用周围背景上的细节来弥补好这个缺陷。譬如在图269里，我们虽然没有看见这个黑点，我们的想象力却会把那两个圆圈上所缺的部分给补出来，使我们自认为已经在这块地方看见了两圆交切的情形。

如果你是戴眼镜的，你还可以做这样的试验：在眼镜玻璃上贴一小块纸(别贴在正中，而要贴在旁边)。头几天这张纸片是会妨碍你看东西的，可是过了一两个星期，你对于它就习惯了，甚至不会觉察到它了。有些人眼镜玻璃裂了缝以后，却又不得不戴它，这样的人，也有类似的经验：他只在最初一些日子里感到有裂缝。可见我们觉察不出自己眼睛里有盲点，同样是长时间的习惯的结果。何况每一只眼睛的盲点使你看不见的地方又是不同的，所以在两只眼睛同时看的时候，在它们的总的视野里，也没



有什么看不见的地方。

你别以为我们视野里的盲点并不大。你如果用一只眼睛看10米以外的一所房屋(图270)，那末由于盲点，你不能看到这所房屋的正面很大一部分地方——直径1米多，容得下整个一扇窗。你如果注视天空，也有一块地方看不见，它的面积大约等于120轮满月。

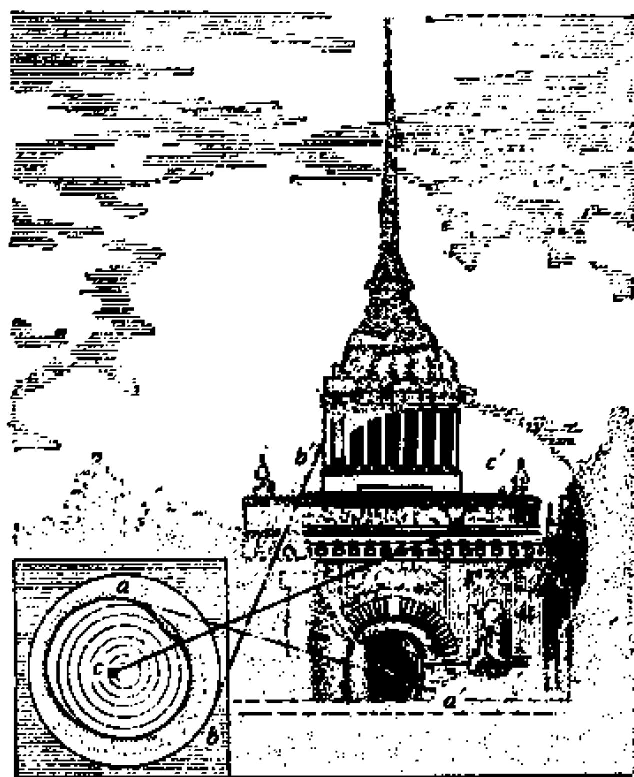


图270　用一只眼睛看建筑物，视野里就有一块和那只眼睛的盲点 c 相应的小区域 c'，我们完全看不见

月亮在我们眼里有多大

这里我要顺便谈一谈月亮在人眼里的大小。如果你问一下熟人，月亮在他们眼里有多大，你就会得到各式各样的回答。大多数人都会说，月亮有盘子那么大。可是也有人说，它的大

小像一个装果酱的碟子，或者像一个樱桃，一个苹果。还有一位中学生说，月亮在他眼里常常“像一张可以坐 12 个人的大圆桌面那么大”。又有一个现代的文艺作家肯定说，在空中有一个“直径 1 米的月亮”。

同样一个物体，为什么对它的大小有这么多不同的说法呢？

这是由于人们对距离的估计各有不同，而且，这种估计常常是无意识的。把月亮看成像苹果那样大小的人所想象的月亮离自己的距离，一定比把它看成像盘子或圆桌面的人所想象的要近得多。

可是，大多数的人都认为月亮有盘子那么大。从这里可以得出一个有趣的结论。如果算一算(算法读了下文自然会清楚)应该把一个盘子般大的月亮放在多远的地方，它才会有见到的这种大小，那算出的这个距离不超过 30 米。请看我们在不知不觉中把月亮放在多么近的地方了!

有不少错觉也是由于对距离估计错误而起的。我小的时候，“那时候一切生活上的印象对于我都是新鲜的”，我曾经有过几次视觉上的错误，这些事到现在还记得很清楚。我是生长在城市里的人。有一年春天，我到郊外去闲游，那时候我生平第一次看到了一群在草地上放牧着的牛。因为我估计距离不正确，这些牛在我眼里就似乎非常小。这样的小牛在那一次以后我再也没有看到过，当然，也决不会再看到。[1]

天文学家确定天体的视大小，是用我们看到天体所夹的角的大小。这个角叫做“视角”，它是从所看的物体的两个极端引到眼里来的两条直线形成的(图 271)。我们知道角是用度、分、秒

---

〔1〕可是成年人有时候也有同样的错觉。格利高罗维奇在《庄稼人》这本小说里写的一段话可以证明：

“附近的景象就好像展现在掌上；树似乎就在桥旁边；房屋、山岗和小桦树林，现在似乎都跟村庄连接在一起。所有这一切——房屋、花园、村庄——现在都像是那种用藓茎当树、用玻璃片当河的小玩意。”



来计算的。提到月面的视大小，我们不说它等于一个苹果或一个盘子，却要说它等于半度；意思就是从月面的两边引到我们眼里来的两条直线，会形成一个半度的角。这种确定视大小的方法才是惟一正确的方法，不会发生误会。

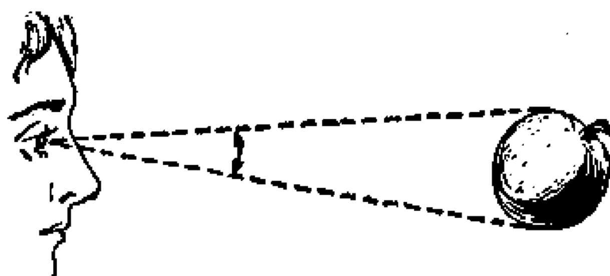


图 271　视角

几何学告诉我们[1]，物体离开眼睛的距离如果大到物体直径的 57 倍，这物体在观察者的眼里所形成的视角是 1 度。例如，如果把一个直径为 5 厘米的苹果放在离眼睛 5×57 厘米的地方，它的视角就是 1 度。如果把这个距离加倍，它的视角就是半度，也就是我们眼里所见的月亮的角度。如果你乐意，你可以说，月亮在你眼里跟苹果一般大——可是得在这样的条件下，就是苹果必须离你的眼睛 570 厘米(大约 6 米)。在你想把月亮的视大小比做盘子的时候，你必须把盘子放在离你大约 30 米远的地方。大多数人都不愿相信月亮会是这样小，可是请你把一枚一分的硬币放在离你眼睛相当于它的直径 114 倍那么远的地方。这时候，虽然它离开眼睛有 2 米，可是恰巧能把月亮遮住。

如果有人建议你在纸上画一个圆圈来表示肉眼所见的月亮，那这任务对你说来是不够明确的：因为圆圈可大可小，就看你把它放在离你眼睛多远的地方。可是如果我们提出我们是在平时读书看图的时候所保持的距离上，也就是所谓明视距离上，对于普通的眼睛，这个距离等于 25 厘米，那条件就明确了。

这样，让我们来算一算，印在这本书上的一个圆圈应当有多大，才能和月面的视大小相等。算法很简单：只要用 114 来除明

---

〔1〕读者如果对有关视角的几何学算法感兴趣，可以在我所写的《趣味几何学》里找到解释和实例。

视距离 25 就行了。得出来的是一个很小的数值——比 2 毫米稍微大一些！它的宽度大约和这本书里脚注的字差不多。

月亮和太阳的视大小是相等的，就是说它们的视角都是这样小，这简直很难使人相信！

你也许已经注意到：你的眼睛朝太阳看了以后，视野里很久都会有一个光圈在闪烁。这就是所谓“光的痕迹”，有同太阳一样的视角。可是它们的大小是会变动的：在你看天空的时候，它们同日面一样大；如果你把眼光移到放在面前的一本书上，那这个太阳的“痕迹”在纸上所占的位置，就会是一个直径大约是 2 毫米的圆圈。这清楚地证明了我们的计算是正确的。

天体的视大小

假如我们按照这个比例在纸上画个大熊星座的图，把这张图放在明视距离里来看，我们看见的星座就同它在天空中出现的时候我们看到的一样。所以可以说，这就是一张按照天然视角的比例所画的大熊星座图。如果你对这个星座——不但是图，而且直接对它本身——有过很深的印象，那末看了这张图以后，你的脑子里就会重新浮起这个印象来。如果你知道了所有星座的各个主星之间的角距(这可以从天文年历和类似的参考书里找出来)，你就可以用“天然比例”画出一幅整个的天文图来。画的时候，只要准备一张每格 1 毫米见方的方格纸，把纸上每 4.5 毫米当做 1 度就成了(表示星球的圆圈面积，应当比照着亮度来画)。

现在来谈行星。行星的视大小也同恒星一样，小到对肉眼说来只是一些光点。这也是可以理解的，因为没有一个行星(除了在最明亮时期里的金星)，在肉眼里的视角会超过 1 分，也就是说，会超过能使我们分辨出物体大小的临界视角(在比临界视角



更小的视角里，每一个物体对我们说来都只能是一个点)。

下面这张表列着各个行星的视角，每一个行星后面有两个数字，第一个数字是这个行星离地球最近时候的视角，第二个是最远时候的视角：

	视角(秒)
水星	13 ～ 5
金星	64 ～ 10
火星	25 ～ 3.5
木星	50 ～ 31
土星	20 ～ 15
土星的环	48 ～ 35

把这些数值照“天然比例”画在纸上是不可能的：甚至视角1分(也就是60秒)在明视距离里也只有0.04毫米，这个大小肉眼自然是无法分清的。所以我们得按照在放大100倍的天文望远镜里所见的行星圆面来画。图272就是在这种放大情况下画成的一张行星视大小的图。图下的那条弧线代表在放大100倍的天文

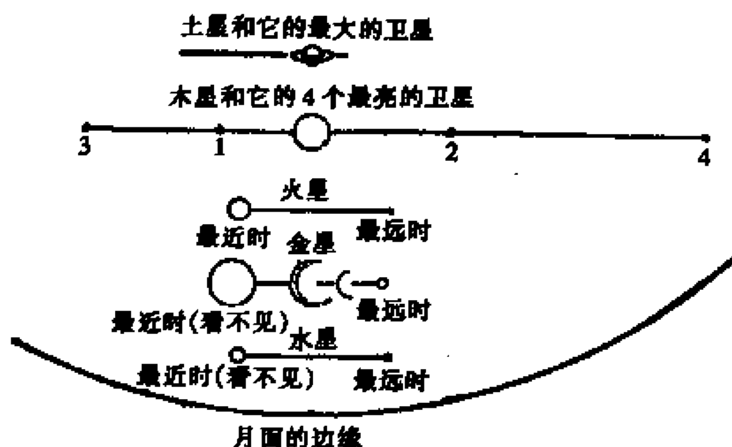


图272　如果把这张图放在离眼睛25厘米远的地方，那末，图里所画的行星圆面在我们眼睛里的大小，就同这些行星在放大100倍的天文望远镜里的大小相等

望远镜里的月面(或日面)的边缘。在这条线上面是水星离地球最近和最远时候的大小。再上去是在各种位相里的金星；它离我们最近的时候是完全看不见的，因为那时候它是用它那没有照到日光的一面朝着我们的。[1] 后来渐渐可以看到它的狭窄的月牙般的形状，所有行星的“圆面”没有比这更大的。在以后的位相里，金星要越来越小。在它满轮的时候，它的直径就只有它在月牙形时候的 1/6。

在金星的上面画的是火星。在左方，你可以看到它在离地球最近的时候我们在放大 100 倍的天文望远镜里望见的大小。在这样小的圆面上你想能够看清些什么呢?还得把这个圆圈再放大 10 倍，你才可以得到天文学家在用放大 1 000 倍的强大天文望远镜研究火星的时候所得到的印象。可是即使在放得这样大的圆面上，什么东西都挤得很紧，你能够不确切地认出那些大家都知道的“运河”之类的细节，或者觉察出那似乎是跟生长在火星的“海”底的植物有关的轻微的颜色变动吗?怪不得某些观察者提出的证据会同别人指出的不一致，或者某些人认为是清楚地看见了的东西，另一些人却认为不过是光学上的幻觉[2]……

庞大的木星和它的那些卫星，在我们这张图里占着显著的位置。它的圆面比其他行星都要大得多(月牙形状的金星除外)，而它的 4 个主要卫星并排排在一条直线上，几乎等于月面直径的一半。这里的木星是离地球最近时候的大小。最后是土星和它的环，以及它的最大的一个卫星(泰坦)，它们在离地球最近的时候，也是相当惹人注目的。

读者由此可以明白，每一个可见的物体，如果我们认为它离

---

〔1〕在这个位置上，我们只能在金星成黑点(所谓“金星凌日”)的形式投射在日面上的时候看到它，但是这种情况非常少见。

〔2〕关于火星和其他行星的最新报道，并不全靠视力来测定。使用各种灵敏的仪表来测量各大行星和它们的卫星的物理条件，都会有十分确切可信的结论。现在空间技术的发展，使人们对于火星的情况，了解得更多了。



我们比较近，看起来就会觉得它小。相反地，如果由于某种原因，我们过大地估计了物体离我们的距离，那末这物体在我们眼里就会相当大。

下一节要讲爱伦坡的一篇很有启发性的描写错觉的故事。这篇故事初看好像不可信，然而却完全不是虚构的。我自己也曾经上过这种错觉的当，饱受了一次虚惊。读者当中一定也有许多人可以从自己的生活里找到类似的情况。

天　蛾

爱伦坡写的故事

在纽约霍乱流行得极可怕的那一年，有一位亲戚请我上他的幽静的别墅去住两星期。假如不是每天有可怕的消息从城里传来的话，我们在那里本来可以过得很好的。可是简直没有一天不收到某个相识的人病死的消息。到末了几天，我们总是提心吊胆地等着报纸。甚至从南方吹来的风，我们看来也好像充满了死亡的气息。我整天觉得心惊胆战。幸而那家主人还比较镇静，总竭力安慰着我们。

有一天，天气很热，太阳快要落山了，我手里拿着一本书，坐在一个打开着的窗子前面。窗外可以看见河那面远处的小山。我的心早已不在书上，却飞到那充斥着凄凉和绝望的城里去了。我抬起头，偶然看了一眼窗外那个小山的裸露的山坡，突然看到一个奇怪的东西：一个丑恶的怪物很快地从小山顶上爬下来，消失在山脚

下的森林里。在刚一看见这个怪物的时候，我还很怀疑我的理智，或者至少我的眼睛是不是很正常。只是过了几分钟以后，我才确信这并不是我的幻觉。这个怪物我看得极清楚。



图273 “……怪物从小山顶上爬下来”

在它从山上往下走的全部时间里，我还仔细地观察了它。可是如果我把它描写出来，读者们也许不会轻易相信的。

我曾经用一些大树的直径同这个怪物比较过，以便确定它的大小，我深信它比任何一只战舰都大。我说战舰，是因为这个怪物的形状很像一艘船：看了一艘装有74门炮的战舰就可以十分清楚地得到关于这个怪物的轮廓的概念。怪物的嘴巴长在一根吸管的尽头，吸管有二三十米长，粗细差不多同普通的大象身体一样。在吸管的根上有一丛丛很密的茸毛，从毛里突出两根发亮的长牙，向下面和旁边弯曲着，像野猪一样，只是它的体积硕大无比。在吸管两旁，还生着两只笔直的大角，长一二十米，看来好像是透明的，在日光下闪闪地发着亮光。这怪物的躯干好像一个顶端朝地的楔，上面长着两对翅膀——每个翅膀大约长100米，一对叠在另一对上面。翅膀上密集地镶嵌着一些金属片，每一片的直径是3～6米。可是这个可怕的怪物的主要特点，还是它那几乎遮住整个胸部的下



垂的头，它的耀眼的白色，在黑色的胸部衬托下，显得非常清楚，好像画出来的一样。

当我正怀着畏惧的心情注视着这个怪物，特别是注视着它胸部的那个可怖的外形的时候，它突然张开了口，大吼了一声……我的神经不能再支持了，而当怪物消失在山脚下的森林里的时候，我也昏倒在地上了……

在我苏醒以后，第一件事就是把所看到的说给我的朋友听。他听完了我的话，先是哈哈大笑，然后神色变得十分严肃，似乎一点也不疑心那是我精神恍惚的结果。

在这时候，我又看到了那个怪物，就高叫着指给我的朋友看。他看了一会，可是肯定说没有看到什么，虽然我在怪物下山的时候详细地对他说明了它的位置。

我用双手遮着脸。在把手拿开以后，怪物已经不见了。

主人开始向我问那怪物的外形。在我详细地告诉了他一切以后，他透了一口气，好像从某种难以忍受的重压下解放了出来似的。他走到书橱旁边，拿了一本博物教科书。他叫我换一个地方，因为靠近窗子看书里的小字比较省力。他在椅子上坐定以后，就打开书对我说道：

“如果你对怪物不描述得那么详细，我也无论如何没法给你解释明白那是什么东西。现在先让我从这本教科书里给你读一段关于昆虫纲鳞翅目天蛾科里的一种天蛾的描述。你听：

“两对带薄膜的翅膀，翅膀上满盖着有金属光泽的带色的小鳞片；口器是伸长了的下颚形成的，在它们的两旁有长着柔毛的触角的原始体；下面的翅膀同上面的翅膀是用坚固的细毛连在一起的。触须像三棱形的突起。腹部是瘦削的。天蛾的头挂在胸部，它又会发出一

种悲哀的鸣声，所以在民间有时候把它看做灾祸的象征。[1]”

读到这里，他合拢了书，靠在窗上，姿势同我在看到“怪物”的时候坐的姿势一样。

“啊！原来就是它！”他叫道，“它正沿着山坡在往上爬，它的样子，我得承认，的确很奇怪。可是它并没有那么大，也不在那么远，不像你所想象的。它正沿着缠在我们这窗子上的一条蜘蛛丝往上爬呢。”

为什么显微镜能够放大

对于这个问题常常可以听到这样的回答：“因为它能像物理学教科书里所说的那样按照一定的方式改变光线的进路。”但是这样的回答只说明了它的原因，还没有说出事实的本质。那末显微镜和望远镜能够放大的基本原因究竟在哪里呢？

它的基本原因，我不是从教科书里知道的，而是当我还是一个小学生的时候，有一次注意到了一种怎样想也想不通的极有趣的现象而偶然理解的。我坐在关着的玻璃窗旁边，眼睛看着小胡同对面的一所房屋的砖墙。突然我恐怖地躲开了。原来我清楚地看见砖墙上有一只好几米宽的人眼在瞪着我……那时候我还没有读过刚才那个爱伦坡的故事，所以没有能够立刻理会到这只大眼睛就是我自己的眼睛在窗玻璃里的反映像，我把这个像看做是在

[1] 现在这种蛾是属于人面蛾属。它是少数能够发声的蛾的一种（它的声音很像鼠叫），又是惟一能够用口器来发声的蛾。它发出的声音相当大，几米以外都能听到。在这里所说的情况里，观察者听到的它的鸣声一定特别大，因为观察者认为这个声源是在极远的地方（参看本书“声音的怪事”）。



很远的墙上，所以才把它估计得这么大。

猜透了这是怎么一回事以后，我就想能不能根据这种错觉的道理来制造显微镜。后来我试验失败了，我才明白显微镜放大作用的本质并不在于它能使被观察的物体显得尺寸大些，而是在于使我们能够在比较大的视角里看物体,因而——这是最重要的一点——物体的像在我们眼睛的视网膜上能够占据比较大的位置。

为了明白视角的作用在这里为什么这样重要，我们应该先来说明一下眼睛的一个重要特点：每一个物体或者它的一部分，我们如果是在比一分小的视角里看它，那它对正常的眼睛说来，就会聚成一点，使我们既看不清它的形状，也分不清它一共有多少部分。当一个物体离开我们眼睛的距离远到(或者物体本身小到)这样的程度，使这个物体的全部或一部分在我们眼睛里的视角比 1 分还小，这时候我们就不能分辨出它的结构上的细节了。原因在于：在这样小的视角里，物体(或物体的任何一部分)在视网膜上的像不能同时接触到许多神经末梢，而只能全部落在一个感觉细胞上。这时候，形状和结构上的细节都消失了——我们看到的只是一点。

显微镜和望远镜的作用是，它们能够改变所观察的物体发出的光线的进路，使我们能够在比较大的视角里看到这个物体。结果，视网膜上的像就扩大到可以接触到更多的神经末梢，而我们也能分辨清楚物体的这些本来看起来是聚成一点的细节了。“显微镜或望远镜放大 100 倍”这句话的意思是，我们通过这种仪器来看物体，视角要比没有它的时候大 100 倍。假如光学仪器不能放大视角，那末

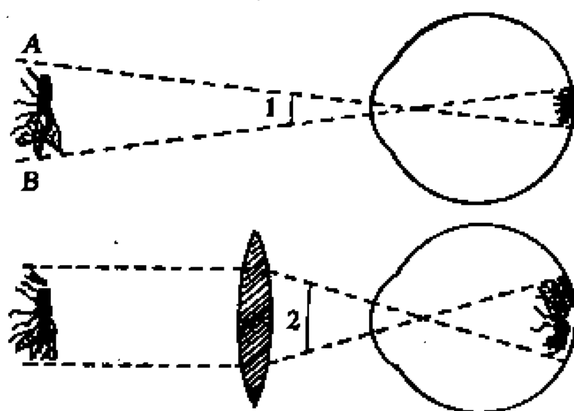


图 274　透镜放大了视网膜上的物像

虽说我们觉得看到的物体是变大了，其实并没有放大什么。砖墙上的眼睛我觉得是很大的——但是，我不能在这个反映的像里看到比镜子里所能见到的更多一些的细节。月亮离地平线近的时候，我们觉得它比起在半空中要大得多——但是在这个好像比较大的月面上，我们能够比它在高空的时候分辨清楚更多的、即使只是多一个的黑点吗?

回头说那在爱伦坡的故事——《天蛾》里所描写的那种放大的情形，我们相信在这个放大了的天蛾的像里，也不能看出任何新的细节来。无论是把这只天蛾的像放到很远的树林里，或是移近到窗框上，我们看它的时候角度都相同，视角并没有改变。视角既然没有改变，那末这个物体的像，无论大得多么使你吃惊，也不能使你从里面看出什么新的细节来。作为一个真正的艺术家，爱伦坡甚至在自己故事的这一点上，也是忠实于自然的。不知道你有没有注意他是怎样描写森林里的“怪物”的。在他所列举的天蛾的那些肢体里，没有一样是我们用肉眼观察天蛾的时候不能看到的新东西。故事有意把天蛾描写了两次。如果把它们拿来比较一下，你就会看出它们之间的区别只是在字句的表达上(直径大约是3～6米的金属片——有金属光泽的带色的小鳞片；两只笔直的大角——触须；像野猪一样的长牙——长着柔毛的触角等等)，至于肉眼所分辨不出的任何细节，在第一次描写里也没有提到。

如果显微镜的作用只是上面所说的那种放大，那它就只是一种玩具，对于科学毫无用处。可是我们知道，实际的情况并不是这样。显微镜在人类面前打开了一个新的世界，使我们天然视力的界限向前推进了一大步。

俄罗斯科学家罗蒙诺索夫在《谈玻璃的用处》里写道：

尽管自然界赋予了我们锐利的目光——

但是它的力量有一个很近的界限。

> 不知有多少生物由于身体微小，
> 我们的目力怎么也看它不见！

但是在现代，显微镜已经给我们揭露了肉眼看不见的、极小的生物的构造：

> 它们用来维持生命力的肢体、关节、
> 心脏、血管和神经是多么细小！
> 小蠕虫的构造的复杂，
> 并不比大海里的巨鲸差多少……
> 显微镜所揭露的看不见的微粒，
> 和身体里的细小血管，真是没完没了！

现在我们已经可以明确地理解了：为什么爱伦坡故事里的观察者不能在怪蛾自己的身上看到的“秘密”，在显微镜里却能够看到。把上面所讲的总结一下就知道，因为显微镜并不是简单地使我们看见物体的放大形态，它还能使我们在比较大的视角里看到这物体。由于视角的加大，在我们眼睛的视网膜上就会出现物体的放大像。这像能作用在数目更多的神经末梢上，使我们感官得到的个别视印象的数目加多。说得简单一些，显微镜所放大的不是物体，而是它们在我们眼睛视网膜上的像。

视觉上的错觉

我们常常说到“视错觉”“听错觉”，但是这个说法是不正确的。感觉器官是不会有错觉的。哲学家康德说得好：“感官不会欺骗我们，并不是因为它们随时在正确地判断，而是因为它们根本

不判断。”

那末，在发生所谓“错觉”的时候，到底是什么在欺骗我们呢？当然，是那执行判断的东西——我们各人的脑子。真的，大部分视错觉的发生只是因为：我们不但在看，而且还在不知不觉中进行判断，在无意中把自己引上了迷途。所以这只是判断上的错误，而不是感官上的错误。

早在二千年以前，古罗马诗人卢克莱修就曾经写过：

> 我们的眼珠也不认识实在的本性，
> 所以请别把这心灵的过失归之于眼睛。

下面是一个大家都知道的视错觉的例子：图 275 里的 A 看上去似乎比 B 要窄些，虽然它们都在同样大小的正方形里。



图 275 哪一个宽些——是 A 还是 B

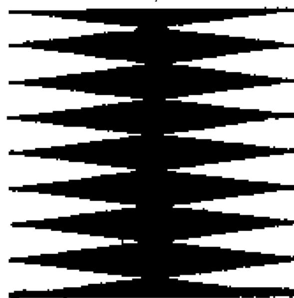


图 276 在这个图里，高度和宽度比较，哪个大些

所以会把它们看错，是因为你估计 A 的高度的时候，不自觉地把各个间隔加了起来。因此，这个高度就好像比同一个图上同等长的宽度更大些。反过来，由于同样的不自觉的判断，B 的宽度又好像比高度更大些。同样原因，图 276 的高度也似乎比它的宽度要大些。



服装和错觉

假如把刚才讲过的视错觉，应用到一些一眼不能立刻看完的大图案上，那我们得到的错觉又会和上节里所得到的相反了。谁都知道，矮胖的人如果穿一身有横条纹的服装，看上去他就不但不会瘦些，反而会更胖些。相反地，他如果穿一身有直条纹和褶皱的服装，就会显得瘦些了。

这个现象应该怎样来解释呢?可以这样来解释：当我们看这样的服装的时候，我们是不能一眼把它看完的；我们的眼睛必然会不由自主地跟着条纹走。眼睛里的肌肉一用力，就迫使我们在不知不觉中把物体在条纹方向上看得过大。我们已经习惯于把视野里容纳不下的大物体的概念同眼睛肌肉的用力联系在一起。但是在我们看小的条纹图案的时候，我们眼睛可以留在原处不动，眼睛的肌肉因而也不会感到疲劳。

哪个更大

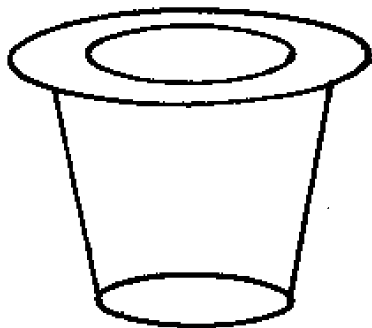


图 277　哪个椭圆形更大些，是下面一个，还是上面放在里面的一个

在图 277 里，哪个椭圆形更大些：是下面一个还是上面放在里面的一个?你可能这样想，认为下面一个比上面那个大些。其实两个都是一样大的。只因为上面那个椭圆形的外面还有一个椭圆形围着，结果就造成一种错觉，认为上面那个

椭圆形比下面那个要小一些。

还有，整个图形在我们看来不是平面的而是立体的——形状像只桶(我们都会不由自主地把这些椭圆形看成是从远处望见的圆，而侧面的两条直线，又会看成是桶壁)，这些都加强了我们的错觉。

在图 278 中，*a* 和 *b* 两点间的距离好像比 *m* 和 *n* 两点间的距离更大些。从同一个顶点引过来的第三条直线更加强了这个错觉。

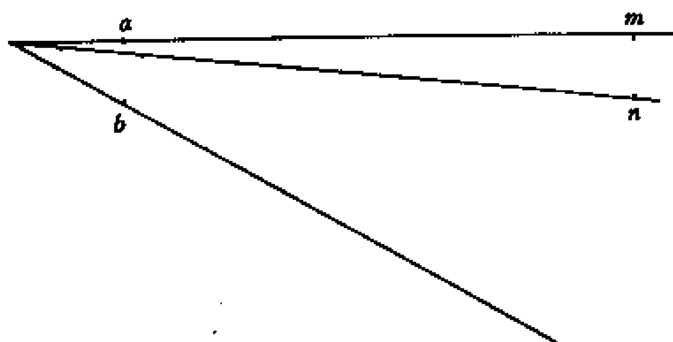


图 278　哪一段距离大些，是 *ab* 还是 *mn*

想象的力量

大多数的视错觉，像已经说过的一样，都是由于我们一面看，一面在不知不觉中进行判断而发生的。生理学家说，“我们不是用眼睛看，而是用脑子看。”你如果熟悉某些幻像，而这些幻像又是你在有意识地把想象力参加到看的过程中以后得到的，那你就会乐于同意上面的说法。

让我们把图 279 仔细看一下。假如你把这张图拿给旁人看，那你就会得到 3 种答案。有的人说这是楼梯，另一些人说这是从

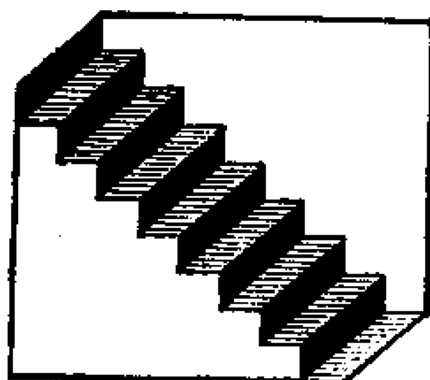


图 279 你在这里看到的是什么，是楼梯，是凹入的壁龛，还是一条折成手风琴褶壁状的纸条

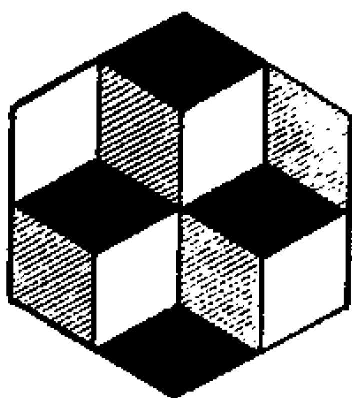


图 280 这里的立方体是怎样排列的，是上面有两个立方体，还是下面有两个立方体

墙壁上挖出来的凹入的壁龛，还有些人会从图里看出一条折成手风琴褶壁状的纸条，并且说，这纸条是斜放在一块白色方块上的。

奇怪的是这三种答案竟都是对的。假如你从不同的方向看这张图，你就可以看到所有这些东西。详细地说，看图的时候，你如果先把视线对准图的左面部分，你就会看到一个楼梯。如果你把目光顺着图从右向左看，你就会看到壁龛。如果你的目光跟着对角线从右下角向左上角斜着看过去，那你就会看到一条手风琴褶壁状的纸条。

可是看的时间过分长了，你的注意力就会疲倦；并且你会轮流地看到这三种东西，一会儿第一个，一会儿第二个，一会儿第三个，已经不管你的愿望是怎样的了。

图280也有同样的特点。

图 281 里的错觉很有

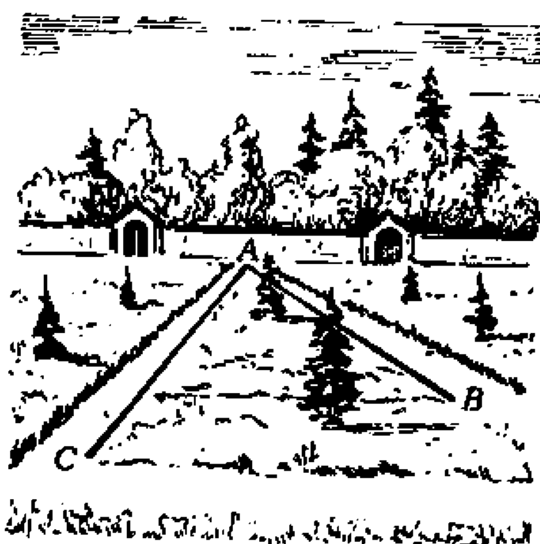


图 281 哪一段长些，是 AB 还是 AC

趣，我们会不由自主地觉得 AB 之间的距离比 AC 短。其实它们是相等的。

再谈视错觉

并不是所有的视错觉我们都能够解释明白的。我们常常不能理解究竟是哪一种推理在我们的脑子里不自觉地进行着，使我们产生这种或那种视错觉。图 282 里可以清楚地看出相对着凸出来的两条弧线。对于这一点，是一点疑问也不会有的。可是你只要拿根尺放在这两条想象的弧线上，或者把这张图拿得同眼睛一般高，然后顺着线看，那你就会看出这两条线都是直的。解释这种错觉却不很容易。

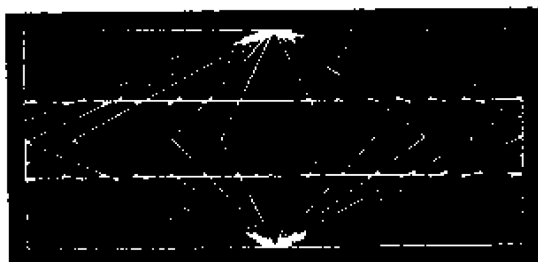


图 282　图的中央，从左到右，有两条平行的直线，可是看上去却像两条相对着凸出来的弧线。在下面两种情况下，这个错觉会消失：1，把这张图拿得同眼睛一般高，然后顺着线看；2，把铅笔的一端放在图上的任一点上，集中目光看这一点



图 283　这条直线上的 6 段线段都相等吗

让我们多举出几个同类的错觉例子来。图 283 里的直线看上去好像被分成几段不等长的线段，可是量一下你就知道，这几段线都是同样长短的。图 284 和图 285 中的平行直线看上去好像是不平行的。

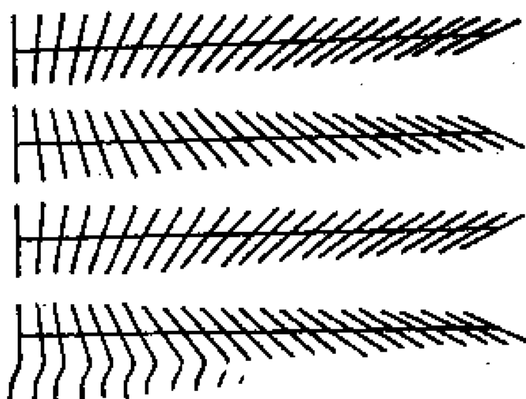


图 284　平行直线看上去好像是不平行的

图 286 里的圆看上去好像是个椭圆。有趣味的是，如果你把

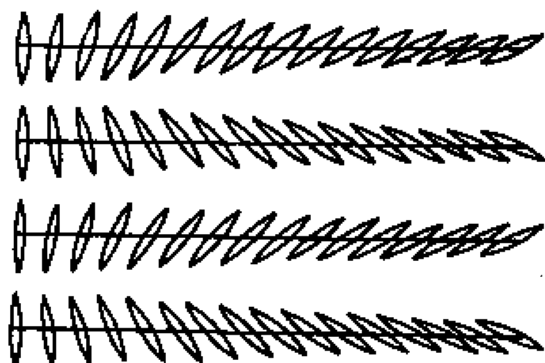


图 285　图 284 错觉的另一种形式

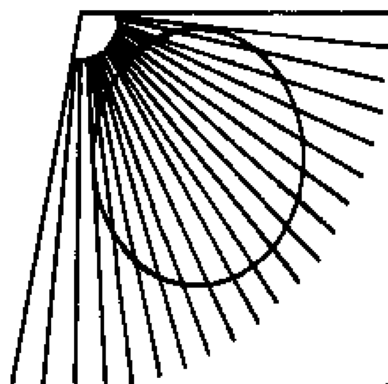


图 286　这是圆吗

使你产生错觉的图 283、图 284 和图 285 放在电火花的光下看，它们就不能再欺骗你的眼睛了。显然，这些错觉和眼睛的移动有关：在电火花短时间发光的情况下，眼睛是来不及移动的。

这里有一个有趣的错觉。看了图 287，请你说出，哪些短横比较长：是左面那些还是右面那些?左面一组看来似乎更长些，尽管两组线是等长的。[1] 这种错觉叫做“烟斗”的错觉。

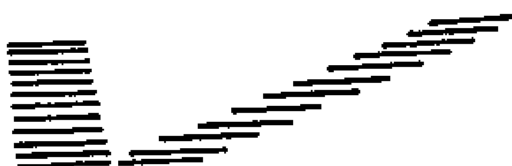


图 287　“烟斗”的错觉。右面的短横好像比左面的短

对于这些有趣的错觉，曾经有过许多解释。可是都很难使人满意，所以我不打算在这里提到它们。可是有一种解释，显然是没有疑问的。它说这些错觉的原因都隐藏在无意识的判断里，人脑常在不知不觉中“卖弄聪明”，结果就会使我们看不到实际的情况。

[1] 顺便说说，这个图是几何学上著名的卡瓦列里定律的图解(“烟斗”的两部分所占的面积是相等的)。

这是什么

看了图 288，你未必能立刻猜到里面画的是什么。你会说“那不过是些黑白点做成的格子网”。可是你把书竖在桌子上，后退三四步，然后看它，你就会看到一只人眼。你走近些——出现在你面前的又只是个什么也不表示的格子网……

你当然会想到这是某一位天才的雕刻家想出来的一种巧妙的“把戏”。不，这不过是一种错觉的粗浅的例子，在我们每次看铜版图的时候都会看到。书上和杂志上的图画，看上去常常是连成一片的，可是你如果用一个放大镜来观察它，那在你面前就会出现跟图 288 所画的一样的那种格子网了。这张使我们看不出东西来的图画不是别的，只是一张放大了 10 倍的普通铜版图的一部分。不同的地方只是书籍杂志上的图画格子小，你在近距离里

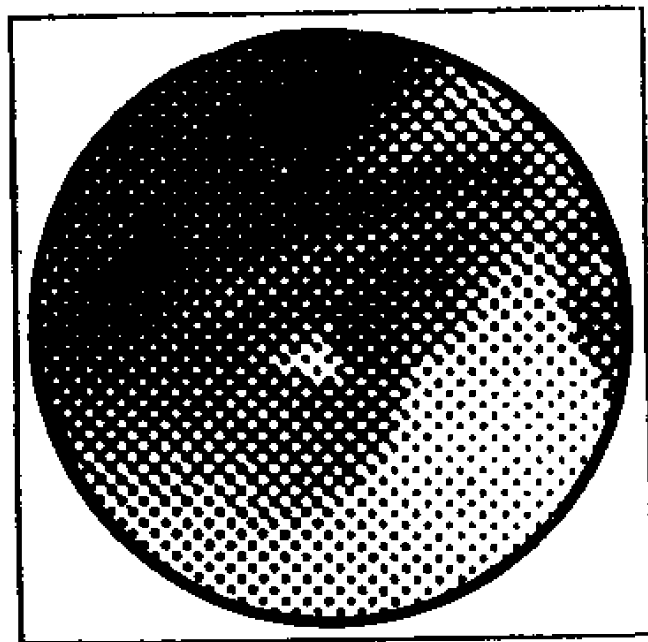


图 288 从远处看这个格子网，很容易看出这是一个脸朝着右面的女子的脸部侧面像，上面有一只眼睛和一部分鼻子



看它，它已经就是密密的一片——通常你看书的时候，眼睛离书的距离就能使你得到这种印象。这里的格子大，要得到同样的印象，就得站在比较远的地方。

奇怪的车轮

你曾经透过栅栏间的缝，或者在电影上观察过跑得很快的货车或汽车的轮辐吗?如果观察过的话，那你一定曾经看到过一种怪现象：汽车在飞快地前进，而它的轮子只是在慢慢地转，或者根本不在转。不但这样，有时候这些车轮甚至还是朝着相反的方向转!这种情况在电影上比透过栅栏看更加清楚些。

这种错觉是这样奇怪，不管是谁，第一次看到的时候都会感到莫名其妙。

原因是这样的。你顺着栅栏走，透过栅栏上的缝看车轮旋转的时候，你一定不能连续地看见那些轮辐，而要隔开一定的时间看到它们一次。因为栅栏上的木板每隔一定的时间要隔断你的视线一次。电影片显示给你的车轮的像也是不连续的，而是隔着一定的时间(每秒 24 张画面)的。

这里可能发生三种情况，让我们逐个地来研究。

第一种可能的情况是，在视线被隔断的时间里，车轮来得及转完整数的圈数——这整数是多少，是 2 或是 20 都没有关系，只要是整数就行。这时候车轮的那些辐条在画面上的位置同它们在前一张画面上的位置完全相同。在下一个时间间隔里，车轮又转了整数的圈数(因为时间间隔的长短和汽车的速度都是不变的)，于是轮辐的位置还是同以前一样。我们所看到的轮辐自始至终都在同一种位置上，因此会得出这车轮根本不在转动的结论(图 289 中间一列)。

第二种可能的情况是，车轮在每一个时间间隔里，不但来得及转完整数的圈数，并且还转了不大的小半转。看到这种变换着的画面的时候，我们不会想到这里还有整数的圈数，而只看见车轮在慢慢地转(每次只转1周的一小部分)。结果我们就觉得汽车虽然走得很快，车轮却转得慢极了。

第三种可能的情况是，在两次摄影的时间间隔里，车轮来不及转完整一圈，离一整圈还差一小部分(例如它只转了315°，像图289第三列所画的那样)。这时候，任何一条轮辐看来都好像在朝着相反的方向转了。这种错觉会一直持续下去，直到车轮改变它的旋转速度为止。

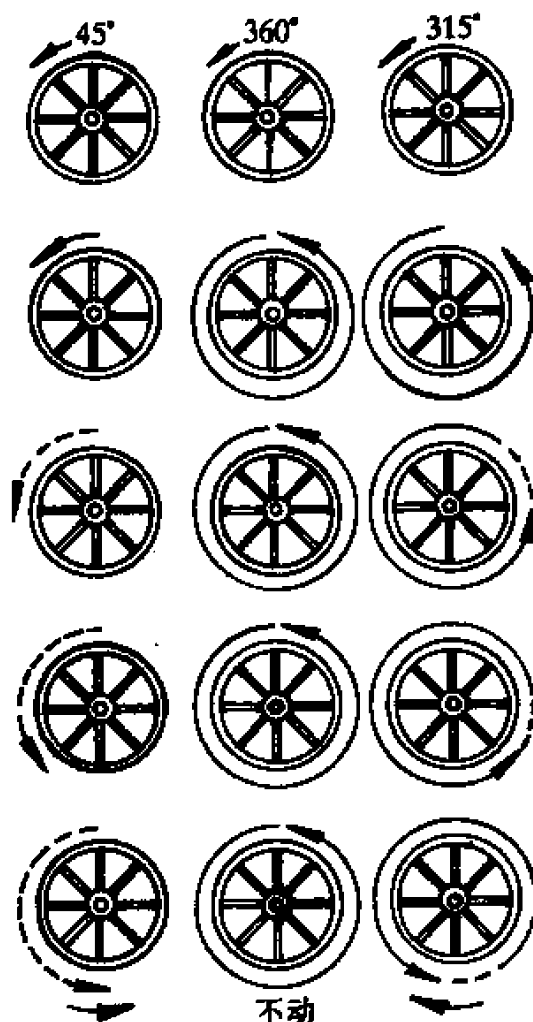


图289　在影片上车轮的奇怪运动的原因

在我们这个解释里，还应当做一些补充。在第一种情况里，为了简单起见，我们曾经说到车轮转了整数的圈数；可是车轮上的每根辐条都是相同的，所以只要让车轮转完整数个的轮辐间空隙数也就足够了。这一点在另外两种情况里也同样适用。

还可能发生另外一种情况。

如果在轮缘上做上记号，而所有的轮辐都是同一个样子的，那末有时候我们就会看到轮缘在朝着一个方向转，轮辐在朝着另



一个方向转！可是如果在轮辐上做上记号，那末这些轮辐可能朝着同记号转的方向相反的方向转，记号好像会从一个轮辐跳到另一个轮辐上去。

如果在电影片上拍摄的是普通场面，这种错觉对于人们认识事物的真相还很少妨碍。可是如果想在银幕上解释某一种机件的作用，那末这个错觉就会产生严重的误解，甚至会把机器的工作完全颠倒过来。

仔细的观众在银幕上看到在飞速前进的汽车的车轮好像不动的时候，在数了轮辐的数目以后，就很容易断定车轮每秒钟大约转多少圈。电影片通过放映机头的速度，一般都是每秒钟 24 张画面。如果汽车轮的辐条有 12 根，那末这车轮在每秒钟里旋转的圈数就等于 $24 \div 12 = 2$，或者在 1/2 秒里转 1 整圈。不过这是最少的圈数，它可以是这个数目的整数倍数(2 倍，3 倍等等)。

如果再把车轮的直径估计出来，就可以算出汽车的前进速度了。例如，如果汽车的轮子的直径是 80 厘米，那末在这里，汽车的速度大约是 18 公里每小时，或 36 公里每小时，或 54 公里每小时等等。

刚才看到的错觉，技术上就利用来计算旋转得很快的轴的圈数。让我们把这个方法所根据的原理解释一下。交流电的电灯的光，实际上不是稳定的，而是每隔 1/100 秒要变弱一下，不过在普通的条件下我们是看不出这种光的闪烁的。现在让我们设想，我们是在用这种光照射图 290 里所画的那种转盘。如果这转盘会在 1/100 秒的时间里转 1/4 周，那就会发生一种意外的情况：我们看不到在普通情况下所看见的均匀的灰色圆盘，却要看到黑的扇形和白的扇形相间着，好像圆盘是不动的似的。

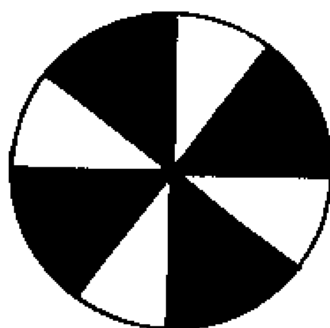


图 290　测定发动机旋转速度的圆盘

这种现象的原因，我想读者研究



了汽车轮子的错觉以后，一定会明白。至于怎样利用这种现象来计算旋转轴圈数，自然也是很容易想到的。

技术上的“时间显微镜”

在前面已经讲过一种利用电影的“时间放大镜”，这里我们要讲另一种能得到类似效果的方法。

我们已经知道，当那每秒钟转25圈的黑白扇形相间的圆盘(图290)受到每秒钟闪烁100次的电灯照射的时候，我们的眼睛会觉得它好像不在动。现在让我们设想光闪烁的次数是每秒钟101次。光闪烁的次数增多了，那末在前后两次光闪烁的时间间隔里，圆盘就不能和以前一样恰恰转完1/4圈了，也就是说，黑白扇形一定来不及转到跟原来相当的位置上。

这时候我们的眼睛看到它落后了一个圆周的1/100。在光第二次闪烁的时候，眼睛又看到它落后了一个圆周的1/100，依此类推。我们看到这个圆盘好像是在向后转，每秒钟转1圈。运动看上去好像慢到了只有原来实际的1/25。

不难想象，如果要看出同样的慢运动，不过不是在相反的方向上，而是跟实际相同的方向上应该怎么办。这只要把增加光闪烁的次数改成减少光闪烁的次数就成。例如，在每秒钟闪烁99次的时候，我们就觉得圆盘是在向前转，每秒钟转1圈。

这里我们就有了慢到只有原来的1/25的“时间显微镜”。可是也完全可能得到比这更慢的运动。例如，如果把光闪烁的次数变到每10秒钟999次(也就是说每秒钟99.9次)，那末我们就会觉得圆盘好像是10秒钟转1圈，也就是说它慢到只有实际的1/250。

任何一种迅速的周期运动都可以使用上面所讲的方法，使它



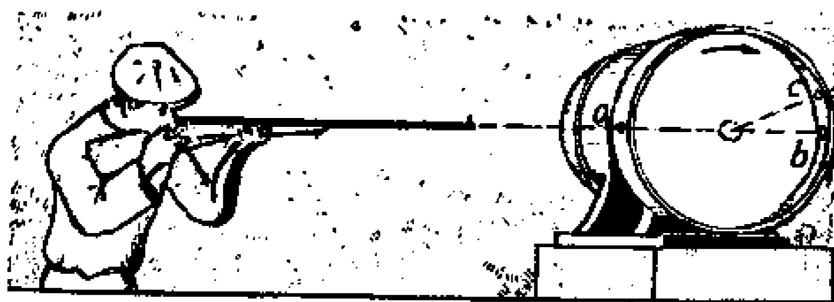


图 291　枪弹飞行速度的测量

慢到我们的眼睛所希望的程度。这个方法使我们可以很方便地去研究极快的机件的运动，用时间显微镜把它们变慢到实际速度的1/100、1/1000。[1]

最后，让我再来介绍一种测定枪弹飞行速度的方法，这方法也是根据转盘的旋转数可以精确地测出而想出来的。用硬纸做一个圆盘，盘面上画有黑的扇形，并且有折转的边缘，这样圆盘就有了打开的圆筒形盒子的形状。把圆盘装在一个很快转动着的轴上(图 291)。放枪的人对准这个圆盒子的直径开枪，把盒子的边缘打穿两个洞。假如这盒子是不动的，那末这两个枪眼一定会落在一条直径的两头。但是这盒子是旋转着的，所以在枪弹从盒这边飞到那边的时间里，盒子还来得及转动一小段路，因而枪弹出盒子的地方就不会是 *b* 点而是 *c* 点。盒子的转数和它的直径是知道的，因此就可以根据 *bc* 弧的长短来计算枪弹飞行的速度。这是一种不很复杂的几何学问题，凡是对数学稍微有点研究的读者，都不难把它算出来。

---

〔1〕根据本节的原理，已经制成一种实用的仪器——频闪观测器，来测定各种快速变化过程的频率。这种仪器十分精确，例如电子频闪观测器可以精确到万分之一。

尼普科夫圆盘

最初的电视装置里使用了一种所谓尼普科夫圆盘，这种圆盘也是视错觉在技术上的一种有趣的应用。图 292 是一块厚实的圆盘，在它的边缘附近钻有 12 个小孔，直径都是 2 毫米。这些小孔是均匀地沿着一条螺旋线排列着的，每一个比相邻的一个离盘的中心近一个孔的地位。这样的圆盘看上去好像没有什么特别。可是你如果把它装在转轴上，并且在它前面安一个小窗，后面放

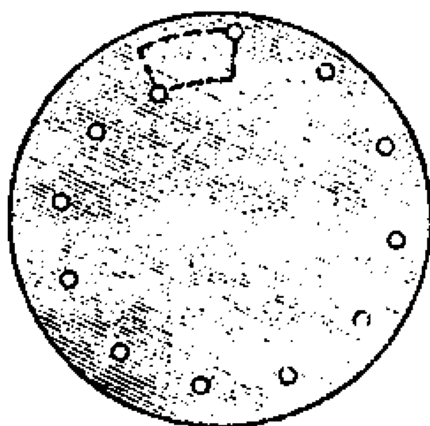


图 292　尼普科夫圆盘

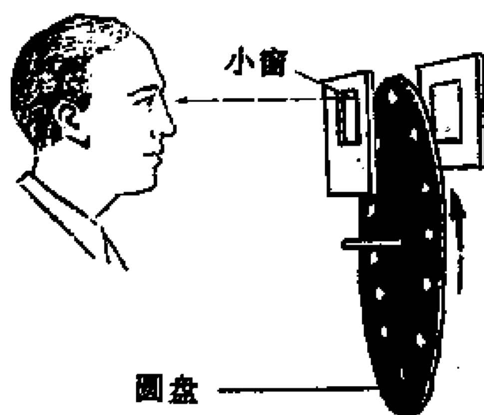


图 293　转动圆盘的奇迹

一张同小窗同样大小的画片(图 293)。让圆盘迅速地旋转起来，那时候就会产生一种意外的现象：在圆盘不动的时候那张藏在后面的画片，在圆盘转动的时候可以在小窗前面看得非常清楚。如果使圆盘的转动变慢，那张画片也就模糊起来；到最后，圆盘完全不转了，整个画片也就看不见了。这时候，你只能看到那两毫米大小的小孔允许你看到的那一点画面。

让我们来研究一下这圆盘为什么会有这种稀奇的效用。我们使圆盘慢慢地转，同时通过小窗细看每一个小孔逐一经过小窗时候的情况。离中心最远的小孔所走的路线离小窗的上部边缘最



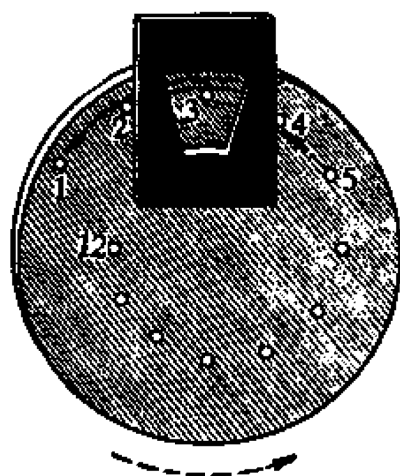


图 294　尼普科夫圆盘的原理

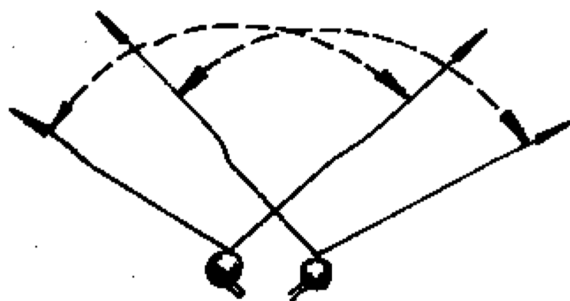
近。如果这个运动非常快，这个小孔就能使我们看到画片最接近上部边缘的整条画面。第二个小孔比第一个低，它迅速地通过小窗的时候，能使我们看到同第一条画面相连接的第二条画面(图 294)。第三个小孔使我们看到第三条画面，等等。在圆盘转得足够快的时候，我们因此就能看到整幅画面，就好像我们对着小窗在圆盘上开了一个同样大小的洞一样。

尼普科夫圆盘自己做起来很容易。要使它转得快，可以把一条绳子缠在它的轴上拉，当然，最好是使用小型电动机。

兔子为什么斜着眼看东西

人是少数能够用两只眼睛同时看一件物体的生物之一。人的右眼的视野跟左眼的视野差不多能叠在一起。

大多数的动物却都是两只眼睛分开看东西的。它们看到的物体，在轮廓上和我们所看到的并没有分别，可是它们的视野却比我们的要宽得多。图 295 画着人的视野：每一只眼睛在水平方向能够看到的最大角度都是 120°，并且两个角几乎是互相重叠的(这是说眼睛在不动时候的情况)。


图 295　人的两只眼睛的视野

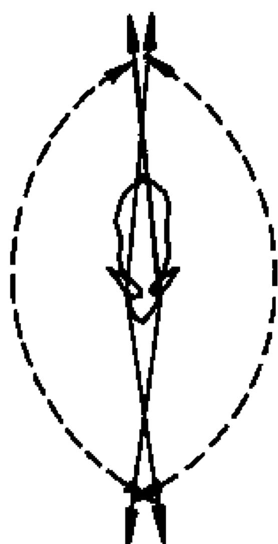


图 296　兔子的两只眼睛的视野

这个图可以同那画着兔子的视野的图 296 比较一下。兔子不必转动头，就不但能够看见前面的东西，并且还可以看见后面的东西。它们左右两眼的两个视野，在前面和在后面都能会合在一起！我们很难偷偷地走近兔子而不把它吓跑，就是这个缘故。从图里又可以清楚地看出，兔子完全看不到就在它鼻子前面的东西。要看十分近的东西的时候，它就得把头侧过来。

几乎没有例外，凡是有蹄类和反刍类动物，都有这种“环”视的能力。图 297 里画的是马的视野的位置：它们在后面不能会合，可是马只要稍微把头歪一下，就能看到放在后面的东西。它这样看到的物像，当然是不很清楚的，但在它四周很远地方出现的很小的动作，都不能逃出它的视线。至于那些行动敏捷、靠袭击别的生物来维持生活的食肉动物，却没有这种环视能力。可是它们具有两眼集中看东西的能力，这就使它们能够准确地估计距离，它一跳就可以跳到那里。

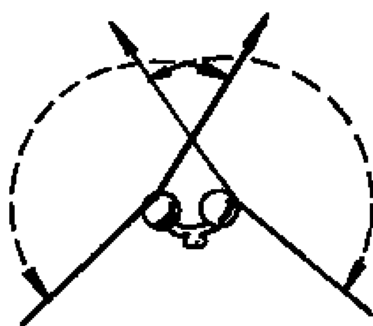


图 297　马的两只眼睛的视野

为什么在黑暗中所有的猫都是灰色的

物理学家会这样说：“在黑暗中所有的猫都是黑色的。”这是因为在没有亮光的时候，任何东西都不能看见的缘故。可是在俗语里提到黑暗的时候，并不是指完全黑暗，而是指光线非常弱。



所以还是“在夜里所有的猫都是灰色的”这句话更正确。我们不说这句话的借喻的意思，它字面上的意义就是说，在光线不足的时候，我们的眼睛就不能分清颜色，因而每一个表面看上去都是灰色的。

这种说法是不是对呢?难道在昏暗的地方红旗和绿叶真的都会同样是灰色的吗?其实这个说法的正确性是很容易证明的。人们在黄昏看物体的颜色的时候，当然都会感觉到，这时候颜色的差别是消失了，一切物体看上去多少都要呈现出深灰的颜色：无论是红色的被子、蓝色的糊墙纸、紫色的花、绿色的叶，都是这样。

契诃夫在他的著作《信》里说道:“放下窗帘以后，太阳光就射不进来，像是已经黄昏了，大花束里的所有玫瑰花，也好像变成了同一种颜色。”

精确的物理试验完全证实了契诃夫的这一个观察。如果用很弱的白光来照射涂有颜色的表面(或者用很弱的颜色光线来照射白色的表面)，然后渐渐加强照明度，这时候眼睛在一开始只会看见简单的灰色，觉不出有任何颜色。只有在照明度加强到一定的程度的时候，眼睛才能开始看出这个表面是有颜色的。这一阶段，叫做“色感觉的下阈”。

所以上面这句俗语(许多种语言里都有这句俗语)的字面上的意义也是完全正确的，在比色感觉阈更低的时候，一切物体看上去都是灰色的。

还曾经发现有所谓色感觉的上阈。在照明度太强的时候，眼睛也会分不清颜色的：所有的颜色表面看上去都变成了相同的白色。



20 声音、波动

声波和无线电波

声音的传播速度大约只有光速的百万分之一。无线电波的速度和光波的传播速度相同，所以声音的传播速度也只有无线电讯号的百万分之一。因为这个缘故就产生了一种有趣的后果，这种后果的实质可以用下面的问题来说明：是谁先听到钢琴的声音，是那坐在音乐厅里离钢琴 10 米远的听众，还是那离大厅 100 公里用无线电收听这音乐的听众?

说也奇怪，虽然无线电听众比音乐厅里的听众离钢琴的距离要大 10 000 倍，可是先听到琴音的还是那无线电听众，因为无线电波传过 100 公里的距离所需要的时间是

$$\frac{100}{300000}=\frac{1}{3000}\text{秒}$$

而声音传过 10 米距离所需要的时间是

$$\frac{10}{340}=\frac{1}{34}\text{秒}$$

由此可见，无线电传播声音所需要的时间，大约只有空气传播声音所需要的时间的 1/100。

声音和枪弹

儒勒·凡尔纳的炮弹向月球飞去的时候，有一件事使炮弹里的乘客感到莫名其妙，就是他们没听到这门大炮把他们从炮口里射出时的声音。不过这是必然的，不论这炮声有多么大，



炮声传播的速度(同一切声音在空气里的传播速度一样)只是 340 米每秒。可是炮弹却用 11 000 米每秒的速度前进。炮弹既然赶在声音的前面，放炮时候的声音达不到旅客们的耳鼓，就是可以理解的了。[1]

现在我们不谈那幻想的炮弹，而谈真正的枪炮的子弹：是子弹运动得比声音快呢，还是声音比子弹更快，可以警告被射击的人快些躲开?

现在的步枪发射时候传给枪弹的速度，差不多是空气里的声音速度的 3 倍，就是大约 900 米每秒(摄氏零度时候声音的速度是 332 米每秒)。当然，声音是均匀地传播的，而子弹飞行的速度却越来越慢。可是在大部分路线上子弹的速度仍然比声音快。从这里就可以直接得出结论，如果在放枪的时候，你听到了枪声或子弹的啸声，那你就不必惊慌了：子弹已经越过你飞向前面去了。还有，枪弹是赶在枪声前面的，所以如果枪弹打中了人，这人应该在枪声到达他的耳鼓以前，就已经被打死了。

假爆裂

飞行物体和它所发出的声音之间在速度上的竞赛，有时候会使我们不由自主地作出错误的、跟实际现象完全不同的结论。

高高地在我们头上掠过的流星或炮弹就是有趣的例子。从宇宙空间进入地球大气的流星，有非常高的速度。虽然大气的阻力已经把它的速度减慢了，但是，它还是比声音的速度高几十倍。

流星划破空气的时候，往往要发出一种类似雷声的噪音。设想我们是在 C 点(图 298)，而在我们上面有一颗流星在沿着 AB

[1] 许多种新式飞机的速度都比声速高得多。

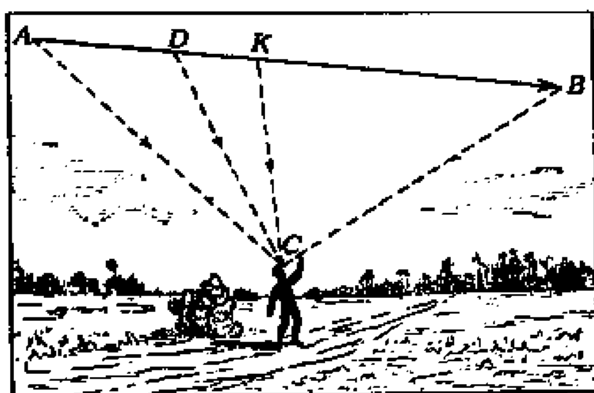


图 298　流星的假爆裂

线飞行。流星在 *A* 点发出的声音，只有在流星本身已经飞到 *B* 点的时候，才能来到我们的耳朵(在 *C* 点)。因为流星的飞行速度要比声音的速度快得多，所以它能够来得及达到某一个点 *D*，并使在这个点上发出的声音比它从 *A* 点发出的声音更早到达我们的耳朵。因此我们先听到的是从 *D* 点来的声音，然后才听到从 *A* 点来的声音。又因为 *B* 点来的声音也比 *D* 点来的声音到达得更迟，所以在我们头顶上某处应当有这样一点 *K*，从这一点上，流星发出的声音应当最早到达我们的耳朵。爱好数学的人如果知道流星的速度跟声音速度的比，就能够计算出这个点的位置来。

于是我们就得到这样的结果：我们所听到的和我们所看到的完全不一样。在我们的眼睛里，流星首先出现在 *A* 点上，接着就从这一点沿着 *AB* 线飞行。可是对我们的耳朵说来，流星却首先出现在我们头顶上某一点 *K* 上，然后我们同时听见两个声音，分向两个相反的方向前进，越来越小下去。这两个方向，一个是从 *K* 到 *A*，一个是从 *K* 到 *B*。换句话说，我们好像听见这颗流星已经爆裂成了两部分，分向两个相反的方向飞去。而在实际上，并没有发生爆裂这回事。请看我们的听觉受到了怎样的欺骗啊！所以许多人说他们亲眼看到过流星爆裂，也许正是由于这种听觉的错觉。



一件幸运的事

假如声音在空气里传播的速度不是340米每秒，而是比这慢得多，那末听觉发生错觉一定还要多。

举例来说，设想声音每秒钟不是走340米，而是走340毫米，也就是说，比人的步行还要慢。现在你是坐在椅子上听你的朋友说故事，而你的朋友却有在讲话的时候来回踱步的习惯。在普通的情况下，他这样的踱步一点也不会妨碍你听他的话的。可是在声音的速度变慢了的时候，你就会一点也听不清你的朋友在说什么了。他先发的声音会同后发的声音同时到达你的耳朵，并且混淆在一起，结果你听到的是一片嘈杂声，一点意思也听不出来。

还有，在你的朋友向你快步走来的时候，他说话的声音还会在相反的顺序里到达你的耳朵：他刚发的声音会最先来到，早发的声音会后一步来到，更早发的到得更迟。因为说话的人在赶着自己的声音，并且始终在声音的前面，继续发出新的声音。这时候，在他所说的那些话里，除非有许多都是像回文体那样倒过来听也是一样的意思，否则你就会一句都听不懂了。

最慢的谈话

不过，假如你认为声音在空气里的真正速度(1/3公里每秒)永远是足够了的话，那你读了这一段以后，就会改变自己的意见了。

设想在相距 1 000 公里的两地之间没有电话，只好装设从前那种在大商店里连接各个房间的传话筒，或者在轮船上为了同机器间通话而装设的传话筒。在通话的时候，你站在这个长线路的这一头，而你的朋友站在那一头。你问他一句话，等候对方回答。可是等了 5 分钟、10 分钟、15 分钟、20 分钟、25 分钟，回音还是没有。你开始焦急起来了，也许会想到同你通话的对方可能出了什么意外了吧。可是你这种担忧是多余的：你的问话还没有到达那一头，这时候它还在半路上呢。要再等二三十分钟，你的那位朋友才能听到你的问话，并且给你答复。可是他的答复从那一头到这一头还得走那么长时间。因此，你发问以后得过一个多小时，才能听到答复。

让我们验算一下：两地相距 1 000 公里，声音每秒钟走 1/3 公里，这就是说，声音在这两地之间得走 3 330 秒钟，或者 55.5 分钟。在这种条件下，从早到晚整天通话，也只能彼此交换十来句话罢了。[1]

声云和空气回声

不但坚硬的障碍物可以反射声音，就像云一类柔软的东西也能够反射声音。不但这样，甚至连完全透明的空气，在某些条件下，就是在这部分空气的传声的能力由于某种缘故变得同其余的空气不同的时候，也能够反射声音。这里发生的现象同光学里所谓“全反射”相像。无形的障壁把声音反射了回来，使我们听到一种不知从哪里来的回声。

---

〔1〕著者在这里略去了声音的振动随距离而减小这一点。实际上，在这样长的路线两端，通话的人是什么也听不见的。



这件有趣的事实是丁铎尔偶然在海边做声音信号试验的时候发现的。他说道:“我曾经得到过从完全透明的空气反射过来的回声。这种回声好像是用魔术从无形的声云里送回来的。”

他所说的声云就是部分能够截住声音、强迫它反射回来、因而产生从“空气来的回声”的透明空气。关于这一点他是这样说的:

> 声云经常飘浮在空中。它们跟普通的云雾没有什么关系。极透明的空气里也许也充满着这种云。这样就会得到空气回声;所以和流行的见解相反,这种回声就是在最明朗的大气里也可能发生。观察和实验证实了有这样的空气回声存在着。冷热不同或所含的水蒸气数量不同的气流,都可以产生空气回声。

能够反射声音的声云的存在,可以解释某些在作战当中有时候能够看到的怪现象。丁铎尔从一个亲自看到 1871 年普法战争的人写的回忆录里,引了下面一段话:

> 6 日早晨跟前一天早晨完全相反。昨天是刺骨的寒冷并且有雾,半里路以外谁也看不见东西。可是 6 日的天气晴朗而和暖。昨天空中充满着声音,而今天却平静得和那不知道有战争的桃花源里一样。我们惊异地你看着我,我看着你。难道巴黎和它的堡垒、大炮、轰击都消失得无影无踪了吗……我坐车来到了蒙莫兰西,从这里我可以看见巴黎北郊的宽广的全景。可是这里也是死一般地沉寂……我遇到 3 个士兵,我们于是开始推测目前的局势。他们都在想这时候大概是在开始和谈了。因为从清晨起,就一声枪响也没听到过……
>
> 我又继续前进到霍涅斯。可是这使我非常惊奇,因为我听说德国人的大炮从早晨 8 点钟起就在猛烈地轰

击。在南方，炮击也是在差不多时间开始的。可是在蒙莫兰西，我却没有听到一点声音……这一切都和空气有关系：今天它传声的能力很差，而昨天却很好。

类似的现象在 1914 ～ 1918 年的第一次世界大战当中，也曾经不止一次地出现过。

听不见的声音

有些人听不见像蟋蟀的鸣声或蝙蝠的吱吱声那样尖锐的声音。这些人的耳朵并不聋——他们的听觉器官很好，可是他们竟听不见非常高的音调。丁铎尔肯定说，有些人甚至连麻雀的叫声都听不见。

一般说来，在我们附近发生的振动，我们的耳朵觉察不到的多得很。如果一个物体 1 秒钟振动的次数不到 16 次，这声音我们就听不见。如果 1 秒钟高到振动 15 000 到 22 000 次以上，我们也听不到它。各人能够察觉的音调的最高界限是各不相同的。老年人的这种最高界限可以低到每秒钟振动 6 000 次。因此有时候会发生这样的怪现象：有些人能听到刺耳的高音，有些人却不能听到。

有许多种昆虫(像蚊子和蟋蟀)发出的声音，振动次数是每秒钟 20 000 次。这些音调当然是有些人听得见，有些人听不见。有些不能觉察高音的人，往往在别人觉得杂乱以及有非常刺耳的声音的地方，感到十分安静。丁铎尔曾经谈到有一次他和一位朋友在瑞士游玩的时候遇到的一件跟这类似的偶然事情，他说道：“大路两旁的草地里到处都是昆虫。在我们听来，这里的空中充满着尖锐的虫鸣声，可是我的朋友却什么也听不见：昆虫的音乐



超出了他的听觉范围。”

蝙蝠的吱吱声比昆虫的刺耳的鸣声要低一个8度音，那就是说，在这种情况下空气振动的次数还要慢一半。可是也有人因为他们的音调觉察力的最高界限还要低，所以蝙蝠对于他们说来也是一种不会发声的动物。

相反地，正像巴甫洛夫的实验室里所证明的那样，狗却能够察觉振动次数高到38 000次每秒的音调，但这已经是“超声”振动的领域了。

超声波在技术上的应用

今天的物理学家和技术专家已经有方法可以创造振动频率比刚才说过的高得多的“听不见的声音”，超声波的振动频率可以高到每秒钟10亿次。

产生超声波的一种方法是利用石英片的一种性能，石英片是用一定的方法从石英晶体上切下来的，在压缩的情况下，它的表面会起电[1]。

如果反过来，在这种石英片的表面上周期地使它带电，那末这表面就会在电荷的作用下，交替着一伸一缩，也就是起了振动：使我们得到超声波振动。使石英片带电，得用无线电技术里所用的电子管振荡器，振荡器的频率可以挑选同石英片“固有”振动周期相合的[2]。

超声波虽然不能被我们听见，但是它们却能用别的极明显的方式来显示出它们的作用。例如，如果把振动着的石英片浸在油

---

〔1〕石英晶体的这种性能叫做压电效应。

〔2〕石英晶体很贵，产生的超声波不强，常用在实验室里。技术上应用的常是人造的合成物质，例如钛酸钡陶瓷。

缸里，那末，在受到超声波作用的那一部分液体的表面上，就会激起高达10厘米的波峰，同时还有小油滴飞溅到40厘米高。把一根长1米的玻璃管的一头浸在这油缸里，并且用手抓住玻璃管的另一头，你的手就会感到非常烫，烫得你的皮肤上会留下伤痕。让这玻璃管的一端跟木料接触，会把木料烧穿一个洞，超声波的能量变成了热能。

现在各国的研究家都在仔细地研究着超声波。这种振动对于生物能够起强烈的作用：遇到它们，海草的纤维会裂开，动物的细胞会破碎，血球会破坏，小鱼和蛙类会在一二分钟里面被杀死。

用超声波做实验的时候，动物的体温会提高，譬如老鼠的体温会提高到45摄氏度。以后超声波还一定会在医药方面起相当重要的作用；听不见的超声波会同看不见的紫外线一起，帮助医师治病。

特别有成就的是在冶金术方面，人们利用超声波来探察金属内部是不是均匀，有没有气泡、裂缝等缺点。利用超声波来“透视”金属的方法，就是把被检查的金属浸在油里，然后使它受到超声波的作用。这时候金属里不均匀的区域就会把超声波漫射开，投射出一种好像是“声音的阴影”来。结果，在那均匀的油面上就会出现金属的不均匀部分的轮廓，这轮廓非常明显，甚至可以照下相来[1]。

用超声波可以“透视”厚到1米以上的金属，这是用爱克斯射线来透视所完全做不到的。超声波在这时候可以发现极小的、小到1毫米的不均匀的部分。毫无疑问，超声波是有非常远大的前途的[2]。

---

〔1〕现在有一种特制的超声波接收器可以代替油。利用这种接收器来测量，工作简单多了。

〔2〕有趣的是我们在自然界也可以遇到超声波。风声和海潮声里都有相当于超声波区的那种频率。许多种生物(如蝴蝶、蝉)都有发射和使用超声波的本领。还有蝙蝠会利用超声波来飞，它们能从反射回来的超声波信号认出路上的障碍来。



小人国居民的声音和格列佛的声音

在影片《新格列佛游记》里，那些小人是用高音说话的，因为只有高音才跟他们的小喉头配合，而大人比佳却用低音说话。

但是在拍摄这部影片的时候，扮演小人的是些成年演员，扮演比佳的是个孩子。那末，影片上的声调又是怎样使它改变的呢?我听了导演的话以后，也觉得十分诧异，他说，演员们在拍摄的时候都是用自己本来的嗓音说话的。他又告诉我，在拍摄的过程中，他用了一种根据声音的物理特点而想出来的方法，这就改变了音调。

为了使小人的声音变高，格列佛的声音变低，电影导演用动得很慢的录音带来记录小人演员的说话；相反地，用动得很快的录音带来记录比佳的说话。在放映时，却用普通的速度放映这影片。

放映的结果正合需要是不难理解的。小人的声音来到听众耳朵里的时候，既然比正常的声音振动次数多，那末音调当然就变高。比佳的声音来到听众耳朵里的时候就比正常的声音振动次数少，这样音调当然就变低。总起来说，在这部影片里，小人说话的音调要比普通成人高一个 5 度音程，而格列佛——比佳——却比普通音调低一个 5 度音程。

“时间放大镜”就这样独特地被利用来处理声音。我们开留声机的时候，如果所用的速度比录音的速度(每分钟 78 转或每分钟 33 转)大或小，也常常可以发生这种现象。



什么人每天可以收到两天的日报

现在我们要研究一个问题，这个问题初看好像跟声音和物理都完全没有关系。可是我却请你们分出一些注意力，因为这个题能帮助我们理解下一节的内容。

这个问题的形式变化很多，也许你已经遇到过这个问题的某一种形式了。从甲地每天中午向乙地开出一列火车。同时，每天中午有一列火车从乙地开往甲地。火车在路上假定要走 10 天。现在问：你从乙地出发到甲地，路上一共会遇到多少列从甲地来的火车？

大家常常这样回答：10 列。在一次数学家会议上，曾有一位数学家在吃早点的时候，向大家提出过这个问题，就有几位学者也是这样回答的。可是这样的回答是错的：你一路不但会遇到你动身以后从甲地开出的 10 列火车，还会遇到你动身以前已经在路上的那 10 列火车。所以正确的答案是 20，不是 10。

再说，每一列从甲地开出的火车，都要装出当天出版的甲地报纸。如果你对甲地的新闻感兴趣，你当然会在车站上购买这种报纸。那末，问你在 10 天的旅程里能买到多少天的甲地报纸？

对于这个问题，你现在已经不难得到正确的答案：20。因为你遇到的是 20 列火车，而每一列火车都带着出发那天出版的报纸，所以你买到的报纸也是 20 天的——也就是说，你每天可以读到两天的报纸。

这个结论似乎有些出乎意料。如果你没有机会从实践当中证明它的正确性的话，你也许会不肯马上相信这个结论的。



火车上的汽笛声问题

如果你的听觉器官很能辨别乐音，那末迎面开来的火车在你旁边经过的时候，你一定会注意到火车头上的汽笛声的音调有什么样的改变(这里是说音调，或声音的高低，不是说响度)。在两列火车接近的时候你听到的汽笛的音调，一定比两列火车相背离去越开越远的时候的音调高得多。如果火车驶得很快(50公里每小时)，那末音调高低上的区别，几乎可以达到一个全音程。

这到底是什么原因呢?

如果你记得音调的高低同振动的次数有关，你就不难猜想到这原因了；你可以把这问题拿来同你研究上节问题的时候所得到的结果比较一下。迎面驶来的火车上的汽笛，自始至终发着一定振动次数的声音。可是你的耳朵却会觉察出不同的振动次数，这是看你是迎着火车走的，还是站着不动的，或是背着声源走的。

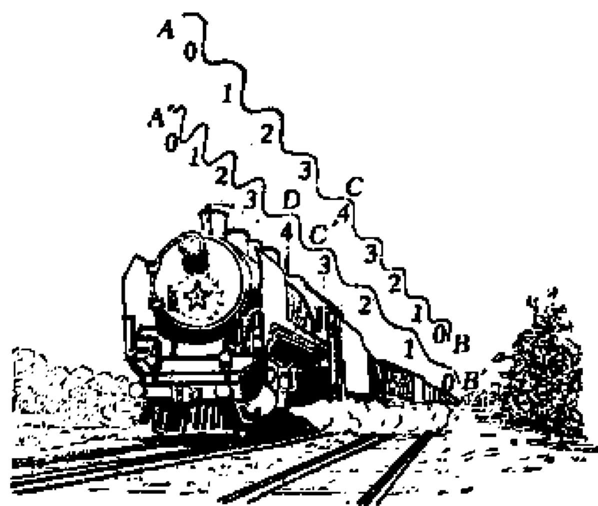


图299　关于火车的汽笛声问题。上面那条曲线代表不动的火车发出的声波；下面那条曲线代表从右向左运动着的火车发出的声波

你坐火车上甲地的时候，每天读到甲地报纸的次数既然比平时多，那末同样的道理，在你向着声源走近的时候，你每秒钟听到的振动次数，也比它们从火车头的汽笛里发出来的振动次数多。不过在这里你已经不必再思考了：你的耳朵已经能听出它的振动次数是增多了——你直接听到了提高了的音调。在你背着火车走的时候，你的耳朵听到的振动次数是减少了——你听到的是降低了的音调。

如果这个解释还不能使你完全信服，那就请你直接研究一下(当然是通过思考)，从火车汽笛里发出来的声波是怎样传播的。首先研究一下火车不动时候的情况(图 299)。汽笛发声的时候会使空气产生波动，为了简单起见，让我们假定只看到 4 个波(图里上面那条波状线)：波从不动的汽笛里出来以后，它在任何时间间隔里，向一切方向传播的距离都是相同的。0 号波来到观察人 A 的时间，和来到观察人 B 的时间是相同的。跟着同时来到两个观察人的耳朵里的是 1 号波、2 号波、3 号波等等。两个观察人的耳朵每秒钟可以得到同样数目的振动，因此两人听到的音调也是相同的。

如果鸣着汽笛的火车是从 B 驶向 A 的(图里下面那条波状线)，那就是另一回事了。设想在某一瞬间，汽笛是在 C'点，而在它发完了 4 个波的时候，它已经来到了 D 点。

现在你可以比较一下，这时候声波是怎样传播的。从 C'点发出的 0 号波，到达 A'和 B'两个观察人的时间是相同的。可是在 D 点发出的 4 号波，到达两个观察人的时间就不相同：路线 DA'比路线 DB'短，因此这个波来到 A'点的时间比它来到 B'点的时间要早。中间的那些波(3 号波、2 号波、1 号波)也要先到 A'后到 B'，不过相差的时间比较短些。结果怎么样呢?在同一时间里 A'点的观察人收到的声波次数一定比 B'点的观察人收到的多，于是 A'点的观察人听到的音调也比 B'点的观察人听到的高。同时，从图里还可以看出，走向 A'点的波，它的长度也相



应地比走向 B'点的波要短些。[1]

多普勒现象

我们刚才谈的现象是物理学家多普勒发现的，所以这个现象就和他的名字连在一起。这种现象不但可以在声音方面看到，在光的现象上也可以看到，因为光和声都是用波的形式传播的。波的次数增多(在声波方面，使我们觉察到音调的变高)使我们的眼睛觉察到颜色的变化。

多普勒的定律使天文学家不但能发现某一颗星是向着我们移近还是离开我们远去的，并且还能测定它们移动的速度。

这一方面帮助天文学家的，是出现在光谱上的一些暗线向一旁移动位置这一个现象。天文学家仔细研究了天体光谱上暗线移动的方向和距离以后，就得到了许多惊人的发现。例如，由于多普勒现象，我们现在知道天空中最亮的星——天狼星，在用 75 公里每秒的速度离开我们远去。这颗星离开我们是这样的远，就是离开我们再远几十亿公里，也不会显著改变它的视亮度。所以假如没有多普勒现象帮助我们，我们大概就很难知道这个天体的运动的情况。

这个例子非常清楚地说明了物理学真是一门范围很广的科学。确定了有关长到几米的声波的规律以后，物理学又把这规律应用到短到万分之几毫米的光波上，然后又利用这些知识来测量那些在无边无际的宇宙空间里急速飞行的庞大恒星的动向和速度。

---

〔1〕必须指出，图上的波状线并不能代表声波的形状。空气里微粒的振动是顺着声音的方向的(纵波)，不是跟声音的方向垂直的(横波)。这里画的振动是垂直方向的，这只是为了读者看起来方便，这里的波峰代表着声音的纵波上被压缩得最紧的地方。

一笔罚金的故事

多普勒在 1842 年第一次想到，观察人跟声源或光源互相接近或远离的时候，观察人的感官同时应该觉察到声波或光波的波长的变动。就在这时候，他又提出了一种大胆的见解，认为恒星所以有各种不同的颜色，也是由于这个原因。他想，所有恒星本身的颜色都是白的；至于有许多恒星看上去有颜色，那是因为它们对我们说来运动得很快。很快走近我们的白星会向地面上的观察者发出缩短了的，使我们产生绿色、蓝色或者紫色感觉的光波。相反地，很快地离开我们的白星，看上去就会是黄色的或者是红色的。

这的确是个独特的、可是无疑是错误的想法。为了使我们的眼睛能够觉察到恒星因运动而产生的颜色的变化，首先需要恒星有巨大的速度——每秒钟几万公里的速度。可是这样还嫌不够：因为在飞来的白星所发的蓝色光线变成了紫色的时候，它的绿线也会变成蓝线、紫线变成紫外线、红外线变成红线了；总之，白光里的各种成分都还存在，因为光谱上所有颜色的位置虽然都有了移动,可是这些颜色的总和在我们的眼睛里应该没有什么改变。

至于跟观察者有相对运动的恒星的光谱里暗线位置的移动，却是另一回事了：暗线位置的移动可以用精确的仪器准确地测出来，使我们能够从我们看见的光线来决定恒星运动的速度(好的分光镜连 1 公里每秒的恒星速度都能确定出来)。

多普勒的错误使我们想到现代物理学家乌德的轶事。乌德有一次把自己的汽车开得太快了，在红灯信号面前来不及停下来，于是警察准备对他罚款。乌德告诉这位维持交通秩序的人说，在车辆疾驰的时候，红色信号的光是会被看成绿色的。假如这位警

察是通晓物理学的，他一定能够算出，汽车必须具有极大的速度，大到 13 500 万公里每小时，才能用科学家的话来为这辩护。

算法是：如果用 l 代表光源发出的光的波长(这里的光源是信号灯)，l'代表观察者觉察到的光的波长(这里的观察者是汽车里的科学家)，v 代表汽车的速度，c 代表光速，那末，根据理论，这些数值之间的关系是这样：

$$\frac{l}{l'} = 1 + \frac{v}{c}$$

我们知道，红色光线里最短的波长等于 0.0063 毫米，绿色光线里最长的波长等于 0.0056 毫米，又知道光速等于 300 000 公里每秒。把这些数字代到上面式子里，得到：

$$\frac{0.0063}{0.0056} = 1 + \frac{v}{300000}$$

从这里得出汽车的速度是：

$$v = \frac{300000}{8} = 37500\text{ 公里/秒}$$

或 13 500 万公里每小时。乌德如果有了这种速度，那他在 1 小时多一些的时间里，就能从警察身旁一直驶到比太阳还远的地方去。据说，他终究还是因“超过规定速度”被罚了款。

用声音的速度走路

假如你用声音的速度离开一个正在演奏音乐的大厅，你会听到些什么呢?

坐着邮政火车从甲地出发的人，在沿路所有车站上，会看到卖报人手里拿着的甲地报纸都是同一天的——也就正是他出

发那天出版的报纸。这是可以理解的，因为这一天的报纸是同旅客一起出发的，至于后来新出的报纸却要乘后来的火车出发。拿这作根据也许就可以推论到：用声音的速度离开音乐厅的时候，我们会在全部时间里听到同一个音，也就是我们出发时候在音乐厅上听到的那个音。

可是这个推论是不正确的。如果你用声音的速度离开，那末声波对你来说是不动的，它根本不能振动你的耳膜，因此你也就不能听到任何声音。你会认为音乐厅已经停止演奏了。

那末同报纸来比较，为什么会使我们得到不同的答案呢?那只是因为我们在这件事里用错了类比法。到处遇到同一天报纸的旅客，如果忘记了自己是在前进的话，那他就一定会认为，甲地的报纸从他出发那一天起，已经停刊了。对于他，报纸好像是已经停了刊，正像对于一个运动着的听者，音乐已经停奏了一样。有趣的是，这个问题虽然并不太复杂，可是有时候连科学家也要被它弄糊涂。在我还是一个中学生的时候，我曾经同一位天文学家(他现在已经去世了)发生过争论。当时他就不同意上面这个结论，却硬说我们用声音的速度离开的时候，我们应当永远听到同一个音。他在信里写着自己的理由，下面是从他的信里摘下来的一段：

> 设想有一个某一定高度的音在响着。它过去是用这个音在响着，将来这个音也要无穷尽地响下去。排列在空间里的许多观察者一定能顺序地听到这声音，并且假定这声音并不减弱，那末如果我们用声音的速度或者甚至用思想的速度，来到任何一位这种观察者的地方，为什么就不能听到它呢?

他又用同样的理由证明，一个用光的速度离开闪电的观察者，会在全部时间里不断地看见这个闪电。他写给我的信里说：



设想在空间连续地排列着许多眼睛。每一只眼睛都要接着前面的一只眼睛收到光的印象。再设想你能理想地并且顺序地来到每一个这种眼睛所在的地方。那就很显然，你在全部时间里，都会看见闪电。

当然，他的这两种说法都是不对的：在上面说的条件下，我们是听不到声音也看不见闪电的。第 501 面里的式子，也能使我们看出这一点。我们在这个式子里假定 $v=-c$，那末，眼睛所觉察到的 l'就变成了无限。l' 无限就等于没有波。

《趣味物理学》写到这里结束了。如果它能使读者引起一种愿望，想要深入研究这门他已经从这里获得了一些简单知识的科学的广大领域，那作者的任务就算已经完成，目的已经达到，并且可以带着满意的心情，在最后一个字的后面加上一个句点了。



译者介绍

符其珣

(1918 ~ 1987)

符其珣是我国著名翻译家。原中国科普创作协会外国科普创作研究委员会主任。祖籍广东高要县。毕业于哈尔滨铁路学院。该校教师全部是苏联人，用俄语授课，在那里，他获得了俄语和科技知识的基础。1937年就读于上海震旦大学，专攻法语。他从30年代至80年代将近半个世纪的翻译生涯，为我国读者翻译科普著作20余种，短文多篇。尤以翻译苏联著名科普作家别莱利曼的科普著作影响最大。为我国科普翻译出版作出了重大贡献。

策划编辑：谭清莲
责任编辑：谭清莲
装帧设计：熊玉心

